

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Paralelní chod transformátorů
Parallel Operation of Transformers

Zadání bakalářské práce

Student:

Miroslav Všetula

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Paralelní chod transformátorů
Parallel Operation of Transformers

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor podmínek pro paralelní chod transformátorů
2. Měření parametrů transformátoru a výpočet náhradního schéma
3. Rozbor vybraných podmínek paralelního chodu modelováním
4. Vyhodnocení získaných dat ze simulace paralelního chodu
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Petrov, G.N. - Elektrické stroje 1, Academia 1980

Jeziarski, E. - Transformátory, Academia 1973

Hrabovcová, V. - Meranie a modelovanie elektrických strojov, EDIS 2008

Bašta a kol. - Měření na elektrických strojích 2, SNTL 1959


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě, dne: 28. dubna 2016

Podpis:

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Čechovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Stanislavu Rusnokovi za velmi cenné a profesionální rady a připomínky při zpracování mé bakalářské práce. Poděkování také patří celé mé rodině za podporu při studiu.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je teoretický rozbor funkce transformátoru, jako takového a hlouběji se zaměřuje na paralelní chod transformátorů a nutné podmínky pro spolehlivou paralelní spolupráci. Obsahem je také měření charakteristik testovacího transformátoru, za účelem výpočtu prvků náhradního schématu, potřebného k sestavení simulačního modelu transformátoru v programu EMTP – ATP a následná simulace a vyhodnocení paralelního chodu transformátorů. Práce se zabývá zejména simulací podmínek, které nelze jednoduše měřit a při kterých transformátory nemohou dlouhodobě pracovat.

Klíčová slova

Transformátor, Paralelní chod, Naprázdno, Nakrátko, ATP, Simulace.

Abstract

The objective of this bachelor's thesis is a theoretical analysis of the function of the transformer as such and more in depth is thesis aimed at parallel operation of transformers and necessary conditions for reliable cooperation. Thesis also includes characteristics measurement of the experimental transformer needed for compilation of simulation model of the transformer in EMTP – ATP software and subsequent simulation and evaluation of parallel operation of transformers. Thesis is aimed mainly on simulation, because various conditions that can occur cannot be easily measured and transformers cannot operate under such circumstances in long term.

Key words

Transformer, Parallel operation, Open circuit, Short circuit, ATP, Simulation.

Obsah

1.	Úvod	1
2.	Historie transformátorů	2
3.	Transformátor	3
3.1	Definice	3
3.2	Princip činnosti	3
4.	Štítkové údaje transformátorů	4
5.	Magnetický obvod	5
5.1	Provedení	5
5.2	Ztráty v železe	6
5.3	Nasycení magnetického obvodu	7
5.4	Magnetické obvody třífázových transformátorů	7
6.	Vinutí	7
6.1	Základní vlastnosti	7
6.2	Provedení	8
6.3	Rozptylový magnetický tok	8
7.	Náhradní schéma transformátoru	9
8.	Chod naprázdno	11
9.	Chod nakrátko	13
10.	Zapojení vinutí	15
10.1	Spojení vinutí Hvězda – Hvězda (Yy)	15
10.2	Spojení vinutí Hvězda trojúhelník (Yd)	15
10.3	Spojení vinutí Trojúhelník – Hvězda (Dy)	15
10.4	Spojení vinutí Hvězda – Lomená Hvězda (Yz)	15
10.5	Sudé skupiny:	15
10.6	Liché skupiny:	15
11.	Paralelní chod transformátorů	17
11.1	Význam paralelního chodu	17
11.2	Podmínky pro paralelní chod	17
12.	Měření transformátoru naprázdno	20
12.1	Schéma zapojení:	20
12.2	Postup měření	20

12.3	Tabulka naměřených hodnot:	21
12.4	Příklady výpočtu:	21
12.5	Vykreslení závislosti I_0 , P_0 , $\cos\varphi_0$	22
13.	Měření transformátoru nakrátko:.....	23
13.1	Schéma zapojení:.....	23
13.2	Postup měření.....	23
13.3	Tabulka naměřených hodnot:	23
13.4	Příklady výpočtu:	24
13.5	Vykreslení závislosti I_k , P_k , $\cos\varphi_k$	24
14.	Výpočet parametrů náhradního schéma transformátoru.....	25
14.1	Výpočet příčné větve (Chod naprázdno).....	25
14.2	Výpočet podélné větve (Chod nakrátko).....	26
15.	Simulace v ATP	27
15.1	O programu ATP	27
15.2	Nastavení obvodových prvků.....	27
15.2.1	Nastavení simulovaných transformátorů.....	27
15.2.2	Nastavení parametrů vedení.....	28
15.2.3	Nastavení parametrů zátěže	28
15.3	Ideální stav paralelního chodu.....	29
15.4	Zapojení Yd fázový posun o 1 hodinu (30°)	30
15.5	Zapojení Yy fázový posun o 4 hodiny (120°)	31
15.6	Připojení transformátoru s rozdílným napětím nakrátko.....	33
15.7	Připojení transformátoru s rozdílným převodem a napětím nakrátko.	34
15.7.1	Transformátor s menším převodem	34
15.7.2	Transformátor s větším převodem	35
16.	Vyhodnocení výsledků simulací	36
17.	Závěr	37
18.	Seznam literatury.....	38

Seznam některých použitých symbolů a zkratek

Veličina	Symbol	Jednotka
Elektrické napětí	U	V
Elektrický proud	I	A
Elektrický proud naprázdno	I_o	A
Elektrický proud nakrátko	I_k	A
Magnetizační proud	I_μ	A
Odpor	R	Ω
Odpor magnetického obvodu	R_{Fe}	Ω
Činný výkon	P	W
Zdánlivý výkon	S	VA
Jalový výkon	Q	var
Jmenovitý příkon	P_l	W
Jmenovitý výkon	P_n	W
Frekvence sítě	f_l	Hz
Převod	p	-
Účinnost	η	-
Účíník	$\cos \varphi$	-
Účíník naprázdno	$\cos \varphi_o$	-
Účíník nakrátko	$\cos \varphi_k$	-
Rozptylová reaktance	X_σ	Ω
Magnetizační reaktance	X_μ	Ω
Kapacita	C	F
Indukčnost	L	H
Napětí nakrátko	u_k	%
Indukce	B	T
Magnetický tok	Φ	Wb
Impedance	Z	Ω

Seznam ilustrací

Obr. 1 Experimentální prokázání Faradayovy teorie o magnetické indukci. [3].....	2
Obr. 2 Schéma činnosti jednofázového transformátoru [19].....	3
Obr. 3 Nákrety dvou nejpoužívanějších typů jader. [10]	5
Obr. 4 Nákrety cest, kterými se mohou uzavírat vířivé proudy. [7]	6
Obr. 5 Odstupňované jádro třífázového transformátoru s chladicími kanálky [11]	7
Obr. 6 Nákrety uložení válcového a deskového vinutí. [10].....	8
Obr. 7 Nákrety uzavírání rozptylového magnetického toku. [6].....	8
Obr. 8 Náhradní schéma jedné fáze transformátoru s přepočtenými parametry. [18].....	9
Obr. 9 Fázorový diagram proudů v transformátoru, při chodu naprázdno. [14]	11
Obr. 10 Náhradní schéma transformátoru pro měření naprázdno. [14]	11
Obr. 11 Fázorový diagram proudů v transformátoru, při chodu nakrátko. [14]	13
Obr. 12 Náhradní schéma transformátoru pro měření nakrátko.	13
Obr. 13 Tabulka skupin spojení transformátorů. [7]	16
Obr. 14 Schéma paralelního zapojení dvou transformátorů pro vyjádření rovnice vyrovnávacího proudu.	17
Obr. 15 Schéma zapojení pro měření transformátoru naprázdno.	20
Obr. 16 Graf závislosti $I_0 = f(U_0)$, $P_0 = f(U_0)$ a $\cos\varphi_0 = f(U_0)$	22
Obr. 17 Schéma zapojení pro měření transformátoru nakrátko.	23
Obr. 18 Graf závislosti $I_k = f(U_k)$, $P_k = f(U_k)$ a $\cos\varphi_k = f(U_k)$	24
Obr. 19 Náhradní schéma transformátoru pro měření naprázdno.	25
Obr. 20 Náhradní schéma transformátoru pro měření nakrátko.	26
Obr. 21 Nastavení parametrů modelovaného transformátoru.	27
Obr. 22 Nastavení saturační charakteristiky modelu transformátoru.	28
Obr. 23 Celkové simulační schéma.	28
Obr. 24 Ideální stav - Průběh proudů ve fázi A na sekundární straně.	29
Obr. 25 Průběh vyrovnávacího proudu při fázovém posunu 1h.	30
Obr. 26 Vykreslení průběhů proudů, kdy transformátory dodávají proud do své zátěže.	30
Obr. 27 Průběh výsledných proudů pro zapojení $T_1 Yy0$ a $T_2 Yd1$	31
Obr. 28 Průběh vyrovnávacího proudu při chodu naprázdno při fázovém posunu o 4h.	31
Obr. 29 Průběh proudů, kdy transformátory dodávají proud do své zátěže.	32
Obr. 30 Průběh výsledných při zapojení $T_1 Yy0$, $T_2 Yy4$	32
Obr. 31 Průběh výsledných proudů při rozdílném napětí nakrátko.	33
Obr. 32 Průběh výsledných proudů po kompenzaci rozdílného $u_{k\%}$ tlumivkou.	33
Obr. 33 Průběh vyrovnávacího proudu při rozdílném p a $u_{k\%}$	34
Obr. 34 Průběh výsledných proudů při připojení k zátěži.	34
Obr. 35 Průběh vyrovnávacího proudu při rozdílném p a $u_{k\%}$	35
Obr. 36 Průběh výsledných proudů při větším převodu a stejném $u_{k\%}$	35

Seznam tabulek

Tab. 1 Tabulka hodnot naměřených při chodu naprázdno.	21
Tab. 2 Tabulka hodnot naměřených při chodu nakrátko.	23
Tab. 3 Tabulka výsledných hodnot získaných simulacemi.	36

1. Úvod

Transformátory jsou v dnešní době nejpoužívanější netočivé elektrické stroje a jejich zastoupení nalezneme napříč výkonovým spektrem. Prakticky jsou jediným efektivním způsobem, jak můžeme regulovat napěťové hladiny v síti. Paralelní chod transformátorů se od paralelního chodu různých točivých strojů liší zejména tím, že paralelní chod točivých strojů lze snadno regulovat, např. změnou buzení, zatím co paralelní chod transformátorů závisí výhradně na jeho vnitřních parametrech a případná obsluha jej tak nemá jak ovlivnit. S přihlédnutím na pokračující růst průmyslu a zemědělství se nároky na kvalitu a velikost přenášeného výkonu zvyšují, proto je třeba počítat s tím, že jeden transformátor o značném výkonu by tak velkému nárůstu časem nemusel stačit. Z tohoto důvodu se volí paralelní chod více transformátorů o menším výkonu. Za další výhodu můžeme považovat to, že jsme schopni připojit nebo odpojit nevyužitou část transformátorů, například v noci, kdy je odběr elektrické energie nízký. Zvýší se tak efektivita systému a zejména se sníží ztráty naprázdno. Zavedením paralelního chodu se také zlepši ekonomičnost systému, zejména pak snížením vnitřního odporu zdroje a snížením ztrát během přenosu energie. Další významnou výhodou je zvýšení spolehlivosti a kvality systému, například pokud je jeden z transformátorů poškozen nebo potřebuje provést údržbu, může být od sítě odpojen, aniž by se přerušila dodávka elektrické energie. Paralelní chod může také zredukovat kolísání napětí při náběhu různých zařízení a zlepšit tak kvalitu napájení.

2. Historie transformátorů

V roce **1820** Hans Christian Oersted jako první objeví, že elektřina a magnetismus mají mezi sebou určitou vazbu. Předvede, že pokud začne vodičem procházet elektrický proud, tak se vodič začne pohybovat v blízkosti magnetu. Tento fenomén dostává název elektromagnetismus a dává základ budoucím moderním technologiím po celém světě. [1]

V roce **1830** Joseph Henry přijde na to, že použitím silného elektromagnetu lze naindukovat proud v druhém elektromagnetu, který vytvoří svoje elektromagnetické pole. Toto je základ pro první transformátory. [2]

V roce **1831** Michael Faraday provede experiment, při kterém namotal dvě izolované cívky okolo železného prstenu. Poté co připojí na první cívku proud, tak se naindukuje proud i na druhé cívce. K tomuto jevu ale dochází pouze tehdy, když zdroj stejnosměrného proudu připojí nebo odpojí.

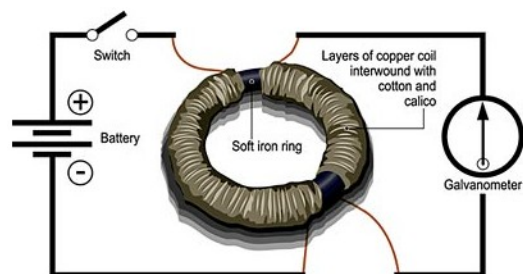
[3]

V roce **1870** jsou vynalezeny první účinné generátory střídavého proudu.

V roce **1886** předvede William Stanley první systém na střídavý proud využívající jednofázový snížovací a zvyšovací transformátor. Tento systém se stane základem pro první moderní přenos elektrické energie. [4]

V roce **1887** C.S. Bradley postaví první třífázový transformátor. [4]

Po roce **1900**, poté co několik napájecích stanic exploduje, je třífázový transformátor stanoven, jako nejlepší způsob dodání elektrické energie. [5]



Obr. 1 Experimentální prokázání Faradayovy teorie o magnetické indukci. [3]

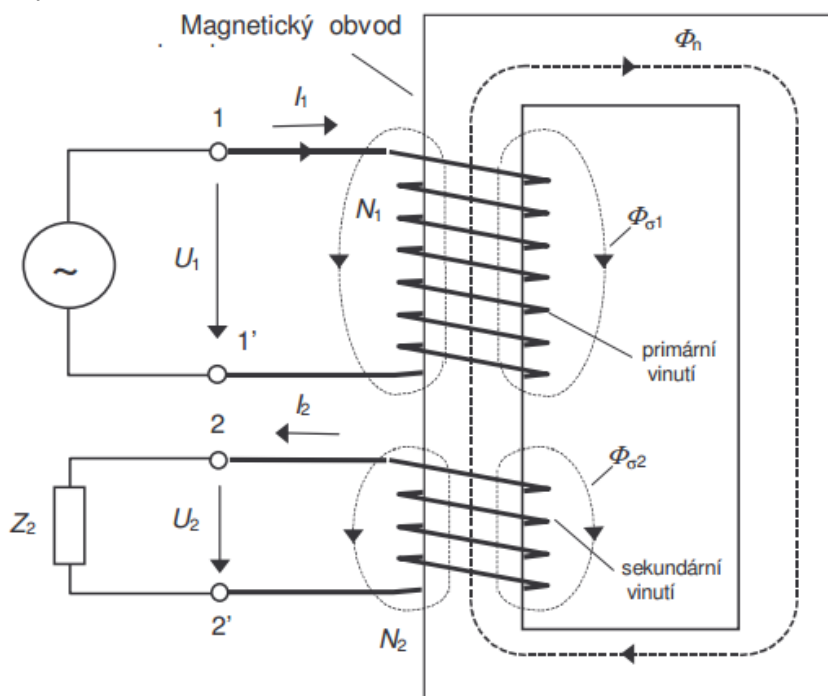
3. Transformátor

3.1 Definice

Transformátorem se nazývá elektrický stroj, který využívá elektromagnetickou indukci pro přeměnu elektrické energie o určitém napětí na elektrickou energii o jiném napětí. Transformátor se v elektrickém obvodu chová jako spotřebič i zdroj zároveň. Odebírá elektrickou energii ze zdroje, ale také dodává elektrickou energii do dalších obvodů.

3.2 Princip činnosti

Transformátor se skládá ze dvou a více od sebe elektricky izolovaných obvodů propojených společným magnetickým obvodem.



Obr. 2 Schéma činnosti jednofázového transformátoru [19]

Přiložíme-li na svorky vstupního vinutí střídavé sinusové napětí, pak tímto uzavřeným obvodem začne protékat proud, který vyvolá v magnetickém obvodu střídavý magnetický tok.

Vyvolaný magnetický tok se poté skládá z hlavního toku, který se označuje Φ_{1h} a rozptylového toku, který se označuje $\Phi_{1\sigma}$.

$$\Phi_1(t) = \Phi_{1h}(t) + \Phi_{1\sigma}(t) \quad (3.1)$$

Tento magnetický tok vyvolá v sekundárním vinutí napětí o jiné nebo stejné amplitudě. [6]

Efektivní hodnota tohoto indukovaného napětí je:

$$U_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \Phi_h \quad (3.2)$$

Po úpravě:

$$U_i = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi_h \quad (3.3)$$

Kde N je počet závitů, Φ_h je výsledný magnetický tok (viz. níže).

Zatížením výstupní cívky začne protékat proud. Smysl a velikost tohoto proudu bude dána charakterem zátěže. Dle Lenzova principu si proud v sekundární cívce vytvoří svůj magnetický tok, který bude působit **proti smyslu** magnetického toku vyvolaného proudem v první cívce.

$$\Phi_2(t) = \Phi_{2h}(t) + \Phi_{2\sigma}(t) \quad (3.4)$$

Výsledný magnetický tok, který se podílí na přenosu energie, je tedy složení dvou hlavních magnetických toků.

$$\Phi_h(t) = \Phi_{1h}(t) + \Phi_{2h}(t) \quad (3.5)$$

[14]

Jaké bude napětí na sekundárním vinutí, udává poměr závitů primární cívky k poměru závitů sekundární cívky. Tomuto poměru se říká transformační převod.

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.6)$$

4. Štítkové údaje transformátorů

1. Druh transformátoru (blokové, distribuční, svářecí..)
2. Jmenovitý zdánlivý výkon
3. Jmenovité napětí
4. Jmenovitý proud
5. Jmenovitý kmitočet
6. Počet fází
7. Spojení fází (trojúhelník, hvězda, lomená hvězda)
8. Procentní napětí nakrátko
9. Druh zatížení (trvalé zatížení, krátkodobé zatížení apod.)
10. Druh chlazení
11. Druh provozního prostředí
12. Ochranné krytí transformátoru
13. Třída izolace vinutí

[7]

5. Magnetický obvod

5.1 Provedení

Magnetický obvod transformátoru se skládá ze vzájemně izolovaných feromagnetických plechů. Rozlišujeme dva druhy provedení magnetických obvodů: jádrový a plášťový:

Železné jádro ovlivňuje funkci transformátoru dvojím způsobem.

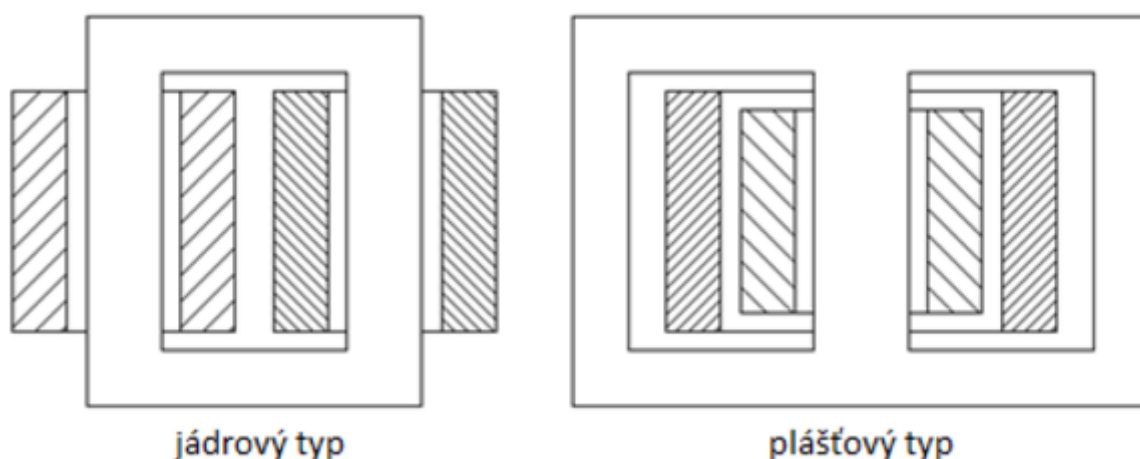
1. Zvyšuje elektrický odpor vinutí v souladu s přiloženým napětím.
2. Železo je feromagnetický kov, který se na povrch nejeví jako magnetický, díky tomu, že má indukční siločáry vzájemně vyvážené. Jeho magnetismus se projeví až po přiložení externího magnetického pole. Toto pole je poté zesíleno a vytvoří se vlastní indukčnost v magnetickém obvodu.

V jádrovém transformátoru jsou jednotlivá vinutí rozdělena na dvou jádrech. Kdyby primární vinutí bylo na jednom sloupku a sekundární vinutí na druhém, tak by transformátor dosahoval malé účinnosti a proto se vinutí rozděluje na poloviny a spojují se paralelně nebo sériově.

V plášťovém transformátoru je vinutí částečně zakryto magnetickým obvodem. Díky tomu je magnetický tok ve středním jádru 2x větší, než v postranních jádrech, a tím pádem mohou mít 2x menší průřez. [8]

Nově se magnetické obvody transformátoru vyrábí také z amorfního kovu (tzv. kovové sklo), což jsou vlastně slitiny krystalické struktury. Jejich hlavní předností je vysoká magnetická měkkost, a tím výrazně nižší ztráty (o 75-85%) při přemagnetování. [18] Jejich další výhodou je odolnost proti mechanickým vlivům a snadná zpracovatelnost. [9] Používají se zejména u výkonových transformátorů do jmenovitého výkonu $S_n = 500 \text{ kVA}$.

Pro vysokofrekvenční transformátory lze použít jádra feritová. Ferit je elektrický téměř nevodivý (velmi malé ztráty vířivými proudy) a mají úzkou magnetizační smyčku (menší hysterezní ztráty).



Obr. 3 Nákreby dvou nejpoužívanějších typů jader. [10]

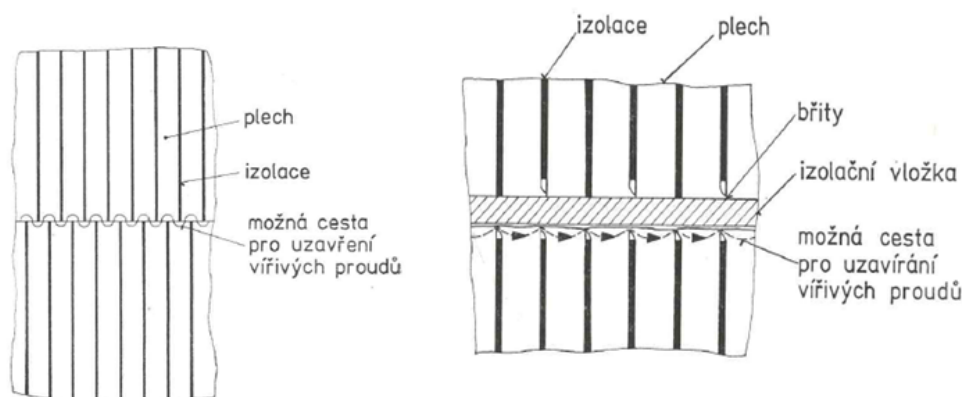
5.2 Ztráty v železe

Ztráty v železe se skládají ze ztrát vířivými proudy a ze ztrát hysterezních.

Vířivé proudy si lze představit, jako velké množství malých proudových smyček, které se uzavírají v podélném směru, a které jsou zdrojem tepelných ztrát. Z tohoto důvodu, není transformátor z celistvého kusu kovu, ale je složen z transformátorových plechů, které jsou od sebe elektricky izolovány. Dále se do těchto trafo plechů může přidat malé množství křemíku a tím dále snížit jeho elektrickou vodivost. Přidáním křemíku se tedy **sníží hysterezní ztráty** a zároveň ztráty **vířivými proudy**, ale zvyšuje se křehkost jednotlivých plechů, což stěžuje jejich zpracovávání. Toto zvyšování křehkosti samotného plechu je hlavním důvodem, který brání dalšímu zvyšování obsahu křemíku. Procentuální příměs křemíku se obvykle pohybuje kolem 3%. [6]

Ztráty vířivými proudy lze vyjádřit:

$$\Delta P_V = k_V \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (5.1)$$



Obr. 4 Nákras cest, kterými se mohou uzavírat vířivé proudy. [7]

Hysterezní ztráty je energie, která se „spotřebovává“ při přemagnetizování magnetického obvodu a jsou úměrné ploše uzavřené hysterezní smyčky. Čím je tedy smyčka užší, tím jsou hysterezní ztráty menší. Tvar samotné smyčky je dán chemickým složením transformátorového plechu a jeho zpracováním, jak tepelným, tak mechanickým. Nečistoty, které zvyšují hysterezní ztráty, jsou zejména uhlík, kyslík, síra a dusík. Nejškodlivějším z vyjmenovaných je zejména uhlík. Přidáním křemíku do transformátorových plechů zamezíme zvýšenému rozpouštění uhlíku.[6] Další snížení hysterezních ztrát lze dosáhnout tzv. magneticky orientovanými plechy. Takové to plechy se válcují za studena směrem, kterým jsou magnetovány.

Vířivé proudy a hysterezní ztráty vznikají nezávisle na zatížení transformátoru, a proto se tyto ztráty počítají ke ztrátám naprázdno.

Jako izolace jednotlivých plechů se dnes používá nejčastěji lak, ale lze se také setkat se staršími typy transformátorů, které jako izolaci používají bavlnu, celulóзовý papír, popř. umělé hedvábí. Izolace mezi vrstvami ocelových plechů se skládá z jednostranné vrstvy laku široké 6 až 10μm, oboustranných vrstev fosforečnanu s tloušťkou 2 až 3μm a kysličníku 2 až 3μm. Poměr aktivní části povrchu jádra k celkovému povrchu se rovná od 0,75 (tloušťka plechu 0,05mm) do 0,92 (tloušťka plechu 0,5mm). [8]

Je také nutné elektricky izolovat různé spojky, kterými se spojují jednotlivé transformátorové plechy, aby se v těchto místech netvořily vířivé proudy.

Hysterezní ztráty lze vyjádřit jako:

$$\Delta P_h = k_h \cdot f \cdot B \quad (5.2)$$

B – maximální hodnota indukce

f – maximální kmitočet přemagnetizování železa

k_h – konstanta závislá na chemickém složení, zpracování atp.

5.3 Nasycení magnetického obvodu

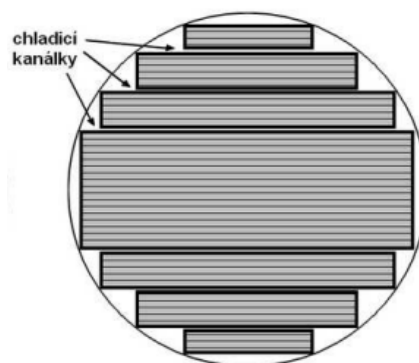
Zvyšováním proudu v primárním vinutí se zároveň zvyšuje působení magnetického pole a tedy velikost magnetizace jádra. Nakonec se můžeme dostat do stavu, kdy stále zvyšujeme zatěžovací proud, ale magnetizace už dále neroste. Tomuto stavu se říká nasycení a začíná se zvyšovat rozptylové magnetické pole okolo jádra transformátoru. Rozptylové magnetické pole způsobuje dodatečné ztráty a působí rušivě na elektroniku. Působení rozptylového pole se zmenšuje, se zmenšující se vzdáleností primárního a sekundárního vinutí. Nejlepší variantou navinutí tedy je, když jsou obě vinutí navinuty na sobě. [8]

5.4 Magnetické obvody třífázových transformátorů

Magnetický obvod trojfázového transformátoru se volí tak, aby docházelo k rovnoměrnému rozložení magnetického toku. Jádra magnetických obvodů se tedy provádějí s kruhovým (nahrazuje se stupňovitým) nebo čtyřhranným tvarem. Díky kruhovému tvaru magnetického obvodu dojde k lepšímu obepnutí vinutím, a tím také k lepší magnetizaci obvodu díky snížení vzduchové mezery mezi vinutím a magnetickým obvodem. Magnetický obvod je také lépe chlazen.

Dříve byla jádra magnetického obvodu stahována svorníky a dřevěnými spojkami nebo ocelovými rámy. Tím docházelo k zmenšování průřezu jádra, ale zároveň se zvyšovaly ztráty vířivými proudy.

Dnes se celý magnetický obvod stahuje bandážemi z pevného plasu popř. bandážemi z ocelových pásů, které jsou izolovány od samotného jádra a umístěny tak, aby nevytvářeli závit nakrátko. [11]



Obr. 5 Odstupňované jádro třífázového transformátoru s chladicími kanálky [11]

6. Vinutí

6.1 Základní vlastnosti

Mechanická pevnost – Vinutí musí být dost odolné, aby vydrželo elektrodynamické síly, které na něj působí při zkratu.

Elektrická pevnost – Izolace vinutí by měla vydržet dlouhodobé elektrické namáhání při jmenovitých provozních podmínkách. Izolační schopnost vinutí transformátoru by se měla testovat.

Tepelná odolnost – Samotná konstrukce vinutí by měla zaručovat jeho dobré chlazení.

Elektrický odpor – Elektrický odpor vinutí by měl být co nejmenší, aby elektrické ztráty nepřekračovaly stanovené meze. Proudová hustota se u olejových transformátorů pohybuje v rozmezí 2 – 4,5 A.mm⁻² a u vzduchem chlazených transformátorů 1 – 2,5 A.mm⁻². [7]

6.2 Provedení

Z konstrukčního hlediska je rozhodující veličinou elektrický proud. Dle jmenovitého proudu, který bude protékat vinutím, se navrhuje průřez vodiče vinutí a jeho profil. Dle jmenovitého napětí se dále volí druh použité izolace pro odizolování jednotlivých závitů a pro odizolování jednotlivých cívek mezi sebou a mezi jednotlivými částmi transformátoru.

U transformátorů se nejčastěji lze setkat s vinutím kruhovým ($0,02 - 10 \text{ mm}^2$) popř. čtyřhranným ($6 - 80 \text{ mm}^2$).

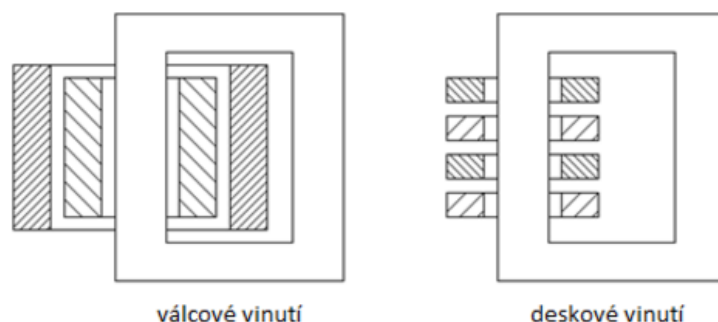
Jednotlivé fáze transformátoru jsou tvořeny primárním a jedním nebo více sekundárními vinutími. Dle provedení lze vinutí rozdělit na deskové a válcové.

Deskové vinutí se skládá ze střídajících se kotoučů cívek primárního a sekundárního vinutí.

Válcové vinutí jsou cívky navinuty po celé délce jádra, kdy se v případě nižších výkonů navine jedna celá cívka, a poté druhá. V případě vyšších výkonů se vinutí vyšší napěťové hladiny rozdělí do několika cívek. Vinutí nižšího napětí je nejčastěji přímo na jádře transformátoru a vinutí vyššího napětí je umístěno vně. Tím se nám zjednoduší řešení izolace takového transformátoru a zároveň se dosáhne vysoké účinnosti.

Nejčastěji se u jádrových transformátorů používá vinutí válcové a u plášťových transformátoru vinutí deskové.

K samotné výrobě vinutí se používá nejčastěji měď, ale lze se setkat i s hliníkovým vinutím. Hliník se používá zejména proto, že mědi je celkově nedostatek, díky jejímu širokému zastoupení v průmyslu. [6]



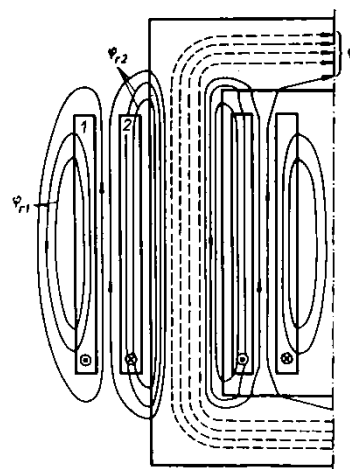
Obr. 6 Nákrasy uložení válcového a deskového vinutí. [10]

6.3 Rozptylový magnetický tok

U transformátoru se kromě siločar uzavírajících se v magnetickém obvodu objevují také siločary uzavírající se mimo magnetický obvod. Magnetický tok Φ plní zásadní úlohu v činnosti transformátoru. Díky tomuto toku je transformátor schopen přenášet výkon z primárního vinutí do vinutí sekundárního a nazýváme ho tedy hlavním tokem.

Toky Φ_{o1} a Φ_{o2} se uzavírají okolo vinutí samotného a na magnetizaci obvodu se nepodílejí, nazýváme je tedy rozptylové magnetické toky. V běžných transformátorech se maximální hodnoty rozptylových toků pohybují řádově v procentech maximálního hlavního toku.

Rozptylové magnetické toky hrají důležitou roli ve funkci transformátoru a do určité míry na nich závisí změna napětí při zatížení, možnosti paralelní spolupráce transformátorů a chování transformátoru při zkratu.



Obr. 7 Nákras uzavírání rozptylového magnetického toku. [6]

7. Náhradní schéma transformátoru

Náhradní schéma transformátoru je obvod, skládající se z odporů a indukčností, které respektují jednotlivé ztrátové činitele v transformátoru. Náhradní schéma platí pro ustálený stav transformátoru a pro harmonické průběhy jednotlivých veličin.

Paralelní obvod – charakterizuje ztráty v magnetickém obvodu transformátoru. Respektuje hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. Ztráty v této větvi se měří měřením naprázdno (viz. níže).

R_{Fe} – ztráty vznikající v železe, které jsou způsobeny hysterezí a vířivými proudy.

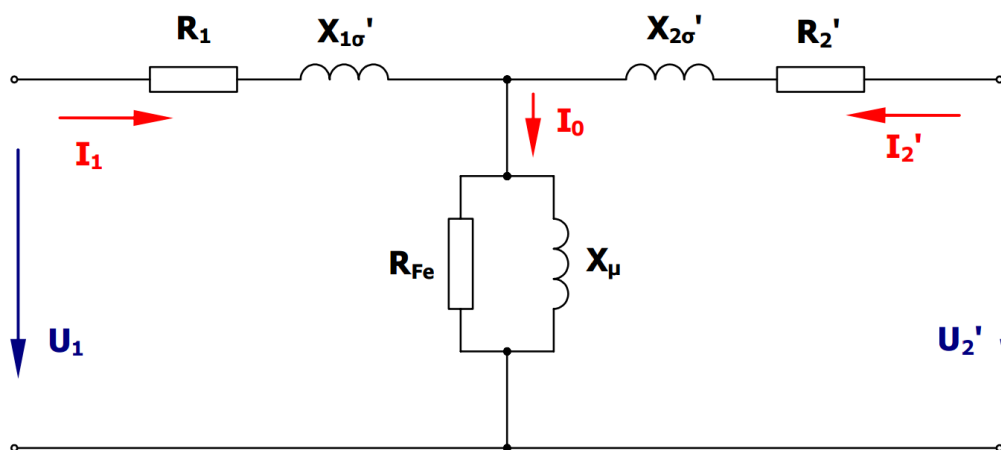
X_{μ} – magnetizační reaktance, vlivem magnetického pole jádra se magnetický tok, který je vyvolán proudem zpožďuje za napětím o 90° .

Sériový obvod – charakterizuje ztráty v samotném vinutí. Ztráty v této větvi se měří při chodu nakrátko (viz níže).

R_1 a R_2' – ztráty vznikající vlivem odporu primárního a sekundárního vinutí.

$X_{1\sigma}$ a $X_{2\sigma}'$ – ztráty na rozptylovou reaktanci vzniklé rozptylovým magnetickým tokem.

[13]



Obr. 8 Náhradní schéma jedné fáze transformátoru s přepočtenými parametry. [16]

Hodnoty R_2' , $X_{2\sigma}'$ a U_2' jsou hodnoty, které jsou přepočítány ze sekundární strany na stranu primární pomocí následujících převodních vzorců, kde p představuje převod transformátoru roven 1.

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma} \cdot p^2 \quad (7.1)$$

$$R_2' = R_2 \cdot p^2 \quad (7.2)$$

$$I_2' = I_2 \cdot \frac{1}{p} \quad (7.3)$$

$$U_2' = p \cdot U_2 \quad (7.4)$$

Použitím Kirchhoffových zákonů lze sestavit algebraické rovnice popisující transformátor.

Napět'ové rovnice náhradního schématu:

$$\begin{aligned} 0 &= -U_1 + R_1 \cdot I_1 + jX_{1\sigma} \cdot I_1 + U_i \\ U_1 &= R_1 \cdot I_1 + jX_{1\sigma} \cdot I_1 + U_i = R_1 \cdot I_1 + jX_{1\sigma} \cdot I + jX_{\mu}(I_1 + I'_2) \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$\begin{aligned} 0 &= -U'_2 + R'_2 \cdot I'_2 + jX'_{2\sigma} \cdot I'_2 + U_i \\ U'_2 &= R'_2 \cdot I'_2 + jX'_{2\sigma} \cdot I'_2 + U_i = R'_2 \cdot I'_2 + jX'_{2\sigma} \cdot I'_2 + jX_{\mu}(I_1 + I'_2) \end{aligned} \quad (7.6)$$

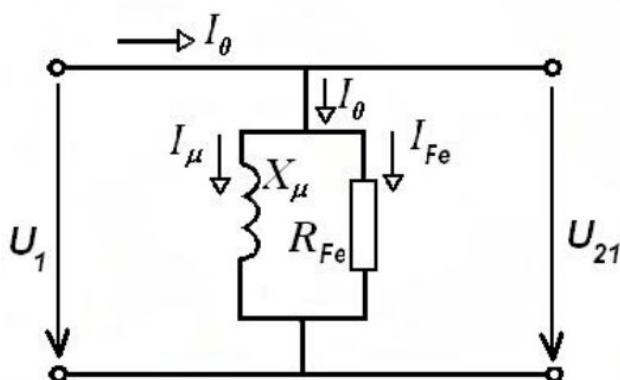
Po úpravě:

$$U_1 = (R_1 + jX_{1\sigma} + jX_{\mu}) \cdot I_1 + jX_{\mu} \cdot I'_2 \quad (7.7)$$

$$U'_2 = jX_{\mu} \cdot I_1 + (R'_2 + jX'_{2\sigma} + jX_{\mu}) \cdot I'_2 \quad (7.8)$$

[14]

8. Chod naprázdno



Obr. 10 Náhradní schéma transformátoru pro měření naprázdno. [13]

Chod naprázdno je stav, kdy sekundární strana transformátoru je rozpojena a proud na výstupu je tedy roven nule.

Primární cívka je napájena a protéká jí tzv. proud naprázdno I_0 . Tento proud je takřka totožný s proudem magnetizačním. Jeho účinník tzv. $\cos \varphi_0$ se pohybuje okolo 0,1, čili tento proud má téměř čistě jalový induktivní charakter. Tento proud vytváří magnetické pole a pokrývá ztráty v železe.

Proud naprázdno je tedy:

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{Fe}^2} \quad (8.1)$$

Pro velikost magnetizačního proudu lze napsat:

$$I_\mu = I_0 \cdot \sin \varphi_0 \quad (8.2)$$

Pro velikost proudu zahrnujícího ztráty v železe:

$$I_{Fe} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (8.3)$$

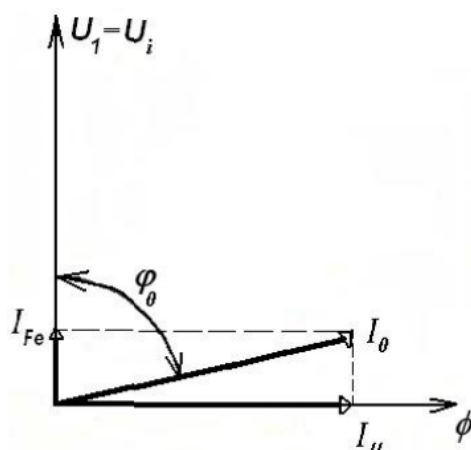
Lze tedy konstatovat, že proud zahrnující ztráty v železe má činný charakter a v náhradním schématu jej tedy vykreslíme jako proud tekoucí odporem R_{Fe} .

Odpor R_{Fe} lze vypočítat jako:

$$R_{Fe} = \frac{Z_0}{\cos \varphi_0} \quad (8.4)$$

Magnetizační reaktance X_μ se poté vypočítá dle vztahu:

$$X_\mu = \frac{Z_0}{\sin \varphi_0} \quad (8.5)$$



Obr. 9 Fázorový diagram proudů v transformátoru, při chodu naprázdno.
Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.

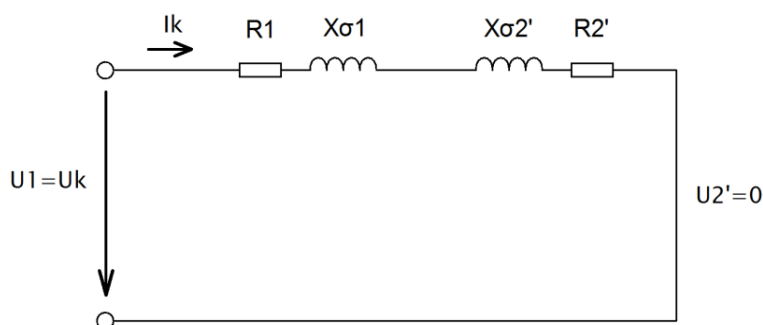
Z_0 je výsledná impedance transformátoru v chodu naprázdno. Velikost této impedance je přibližně stejná jako impedance příčné větve, protože velikost rozptylové reaktance a velikost odporu primárního vinutí je zanedbatelná. Impedance naprázdno je tedy dána vztahem:

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0} \quad (8.6)$$

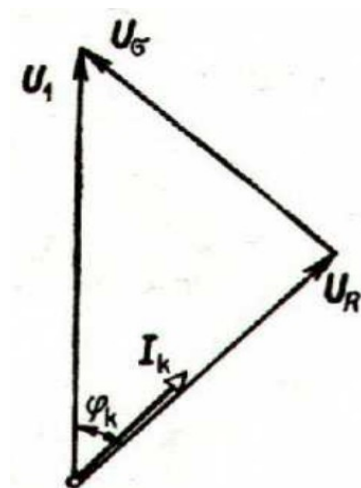
Velikost vstupního odporu vinutí a proudu naprázdno je malá, obvykle je možno Jouleovy ztráty při chodu naprázdno zanedbávat a uvažují se tedy hlavně ztráty v železe.

Při tomto chodu lze měřit převod p daného transformátoru jednoduše zapojením voltmetru na primární a sekundární stranu transformátoru.

9. Chod nakrátko



Obr. 12 Náhradní schéma transformátoru pro měření nakrátko.
Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.



Obr. 11 Fázorový diagram proudů v transformátoru, při chodu nakrátko. [13]

Při chodu nakrátko je primární vinutí připojeno ke zdroji a výstupní vinutí je zkratováno, neboli spojeno nakrátko a výstupní napětí U_2 je tedy rovno nule (při uvažování, že odpor zkratovací spojky je roven nule).

Proud vyvolaný magnetickým obvodem transformátoru je oproti proudu tekoucím podélnou větví zanedbatelný. Impedance příčné větve je oproti impedanci podélné větve větší přibližně o $10^4 \Omega$, můžeme si tedy dovolit zanedbat příčnou větev.

Impedance nakrátko se vypočte dle vztahu:

$$Z_k = \frac{U_1}{I_k} \quad (9.1)$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (9.2)$$

Jednotlivé prvky se pak vypočítají jako:

$$R_k = Z_k \cdot \cos \varphi_k \quad (9.3)$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k \quad (9.4)$$

Protože se na sekundární straně většinou indukuje jiné napětí, než na primární straně, je nutné přepočítat rozptylovou reaktanci a odpor vinutí na sekundární straně na napětí primární strany.

$$R_2' = R_2 \cdot \frac{1}{p^2} \quad (9.5)$$

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma} \cdot \frac{1}{p^2} \quad (9.6)$$

Velmi důležitým parametrem je také napětí nakrátko U_k , což je hodnota napětí, při kterém bude transformátorem procházet jmenovitý proud I_N .

Na štítku transformátoru nejčastěji nalezneme toto napětí, jako napětí nakrátko udávané v procentech jmenovitého napětí a vypočítá se dle vztahu:

$$u_{k\%} = \frac{U_k}{U_N} \cdot 100 \quad (9.7)$$

Lze říci, že napětí nakrátko je číselně stejná hodnota, jako vnitřní impedance nakrátko.

Toto lze dokázat výpočtem:

$$u_{k\%} = \frac{U_k}{U_N} \cdot 100 = \frac{\frac{U_k}{I_N}}{\frac{U_N}{I_N}} \cdot 100 = \frac{Z_k}{Z_N} \cdot 100 = z_{k\%} \quad (9.8)$$

Můžeme říci, že napětí nakrátko nám udává, jak se bude výstupní napětí měnit při změnách zatížení. Transformátory s **malým napětím nakrátko** lze označit, za **tvrdé zdroje napětí** a transformátory s **velkým napětím nakrátko** lze označit jako **měkké zdroje napětí**. [15]

Dále je vhodné uvést, že transformátorem s malým napětím nakrátko, a tedy i malou impedancí nakrátko, poteče při zkratu velký zkratový proud. Vyšší napětí nakrátko uvidíme hlavně u transformátorů určených pro sváření, kde zkrat výstupního vinutí je běžný pracovní stav.

Napětí nakrátko je také důležitým parametrem při nastavování ochran transformátoru.

Pomocí napětí nakrátko lze také spočítat, kolikrát bude ustálený zkratový proud větší oproti jmenovitému proudu transformátoru: [16]

$$I_{kN} = \frac{U_N}{Z_k} = \frac{U_N}{\frac{U_k}{I_N}} = \frac{U_N \cdot I_N}{U_k} = \frac{1}{u_{k\%}} \cdot I_N = \frac{I_N}{u_{k\%}} \cdot 100 \quad (9.9)$$

10. Zapojení vinutí

10.1 Spojení vinutí Hvězda – Hvězda (Yy)

Při vyvedení společného uzlu budeme mít k dispozici jak fázové, tak sdružené napětí. V tomto zapojení není transformátor vhodný pro nesouměrné zatížení a nehodí se tedy pro napájení světelných sítí, kde nesouměrnost může dosáhnout až 20%. Je vhodný pro napájení trojfázových motoru a setkáme se s ním při transformaci na 110 kV.

10.2 Spojení vinutí Hvězda trojúhelník (Yd)

S těmito transformátory se lze setkat při přechodu z napěťové hladiny 110kV na napěťovou hladinu 22kV.

10.3 Spojení vinutí Trojúhelník – Hvězda (Dy)

Vinutí v zapojení D potřebuje pro stejné napětí jako v zapojení Y o 73% více závitů a zároveň lépe izolovaných. Dobře snáší nerovnoměrné zatížení jednotlivých fází a je tedy vhodný pro napájení světelných sítí. Setkáme se s ním při transformaci z VN na NN. [17]

10.4 Spojení vinutí Hvězda – Lomená Hvězda (Yz)

Toto spojení zrovnoměrní zatížení výstupní strany při nerovnoměrném zatížení vstupní strany.

Pro spojení do lomené hvězdy potřebujeme přibližně o 15% více materiálu a z toho důvodu jsou ztráty nakrátko o několik procent větší než při spojení do normální hvězdy. [6]

10.5 Sudé skupiny:

Pro spojení Yy, Dd a Dz jsou základní spojení s hodinovými čísly 0 a 6. Ostatní skupiny se vytvoří pomocí přeznačení svorek. Skupinu 0 lze přeznačkovat na skupinu 4 a 8. Skupinu 6 lze přeznačkovat na skupinu 2 a 10. [7]

10.6 Liché skupiny:

Pro spojení Yd, Dy a Yz jsou základní spojení s hodinovými čísly 5 a 11. Ostatní skupiny přeznačí na svorkovnici. Skupinu 5 lze cyklickou záměnou přeznačit na 9 a 1. Skupinu 11 lze cyklickou záměnou přeznačit na 3 a 7. [7]

Sudé skupiny						Liché skupiny					
skupina	fázový posuv ems	fázorový diagram síťových ems	způsob spojení			skupina	fázový posuv ems	fázorový diagram síťových ems	způsob spojení		
			Yy	Dd	Dz				Yd	Dy	Yz
0	0°					11	330°				
4	120°		totéž schéma	totéž schéma	totéž schéma	3	90°		totéž schéma	totéž schéma	totéž schéma
8	240°		totéž schéma	totéž schéma	totéž schéma	7	210°		totéž schéma	totéž schéma	totéž schéma
6	180°					5	150°				
10	300°		totéž schéma	totéž schéma	totéž schéma	9	270°		totéž schéma	totéž schéma	totéž schéma
2	60°		totéž schéma	totéž schéma	totéž schéma	1	30°		totéž schéma	totéž schéma	totéž schéma

Obr. 13 Tabulka skupin spojení transformátorů. [7]

11. Paralelní chod transformátorů

11.1 Význam paralelního chodu

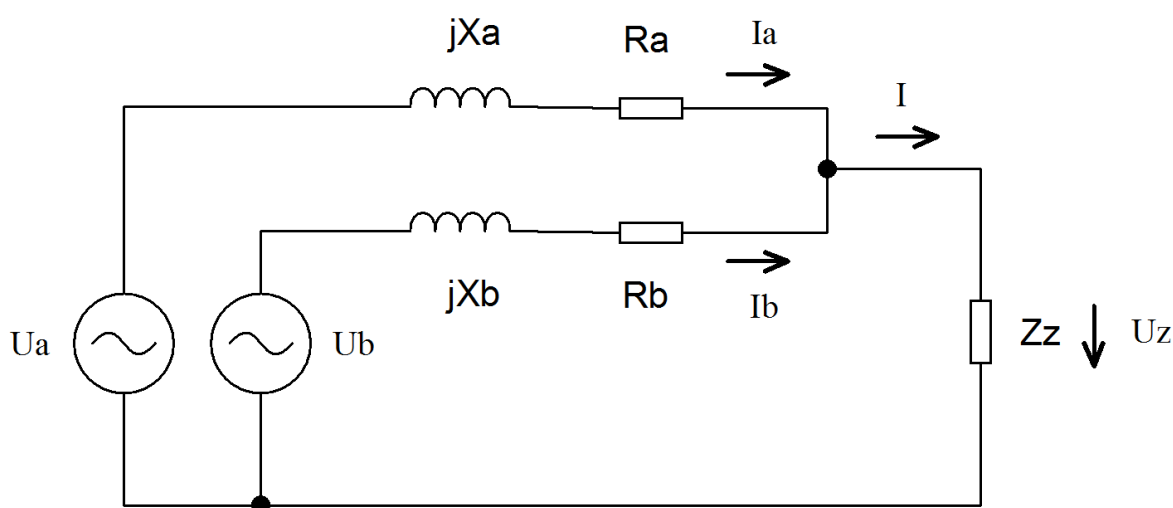
Paralelní chod je zapojení transformátorů, při kterém jsou vstupní vinutí transformátoru napájeny ze stejného zdroje, a výstupní vinutí jsou připojeny na společnou přípojnici. S paralelním chodem transformátorů se lze nejčastěji setkat v rozvodnách. Přesto, že rozdělení výkonu mezi více elektrických strojů má za následek zvýšení celkových ztrát a množství spotřebovaného materiálu, tak lze očekávat, že zatížení jednotlivých transformoven časem poroste a tudíž se jeví jako výhodnější možnost provozovat více transformátorů o menším výkonu a pracujících paralelně. V případě nárůstu zatížení je možno jednoduše přidat další transformátor do spolupráce s ostatními a dosáhne se tak lepšího využití jejich instalovaného výkonu. Zároveň se zvýší spolehlivost dodávky, kdy při poruše jednoho transformátoru mohou zbylé transformátory převzít celý výkon, anebo alespoň jeho část. Dále je možno při nízkém zatížení několik transformátorů odpojit a tím snížit ztráty, a to zejména ztráty naprázdno. Nevýhodnou paralelního spojení transformátorů je zhoršení zkratových podmínek, protože paralelním spojením snížíme celkovou impedanci.

11.2 Podmínky pro paralelní chod

Stejný převod

I při nepatrném rozdílu převodu bude mezi jednotlivými transformátory téct vyrovnávací proud induktivního charakteru. Tyto proudy jsou prakticky nezávislé na zatížení a zatěžují transformátor s nižším převodem. Velikost vyrovnávacího proudu tekoucího transformátorem je omezena pouze vnitřní impedancí stroje. Z výše uvedeného tedy platí, že čím větší napětí nakrátko budou tyto transformátory mít, tím menší vyrovnávací proudy při nesterétném převodu potečou.

Mezinárodní předpisy dovolují napěťovou odchylku rovnou 0,1% hodnoty napětí nakrátko a zároveň nesmí překročit hodnotu 0,5%, čili transformátory s napětím nakrátko 3% mohou mít maximální odchylku převodu 0,3%, ale transformátory s napětím nakrátko 10% už mohou mít maximální odchylku převodu pouze 0,5%. [6]



Obr. 14 Schéma paralelního zapojení dvou transformátorů pro vyjádření rovnice vyrovnávacího proudu.

Obvod představuje sekundární stranu transformátoru. Ve schématu jsou vykresleny dva zdroje, představující rozdílné napětí na sekundárních stranách transformátorů. Z_z představuje impedanci zátěže.

Aplikací druhého Kirchhoffova zákona lze získat napěťové rovnice.

$$U_a = I_a \cdot Z_a + (I_a + I_b) \cdot Z_z = I_a \cdot Z_a + U_z \quad (11.1)$$

$$U_b = I_b \cdot Z_b + (I_a + I_b) \cdot Z_z = I_b \cdot Z_b + U_z \quad (11.2)$$

Po vyřešení dvou rovnic o dvou neznámých I_a a I_b získáme rovnice:

$$I_a = \frac{U_a \cdot Z_b + (U_a - U_b) \cdot Z_z}{Z_a \cdot Z_b + (Z_a + Z_b) \cdot Z_z} \quad (11.3)$$

$$I_b = \frac{U_b \cdot Z_a + (U_b - U_a) \cdot Z_z}{Z_a \cdot Z_b + (Z_a + Z_b) \cdot Z_z} \quad (11.4)$$

Pokud nebude zátěž připojena, tak bude vlivem napěťové nesymetrie téct vyrovnávací proud. Ten si můžeme vyjádřit jako:

$$I_a = -I_b = \frac{(U_a - U_b)}{(Z_a + Z_b)} \quad (11.5)$$

U_a – Napětí na sekundární straně.

Z_a – Impedance nakrátko, přepočtená na výstupní stranu.

Velikost napětí na zátěži U_z můžeme jednoduše vypočítat jako:

$$U_z = I_z \cdot Z_z \quad (11.6)$$

Pokud známe velikost U_z , tak můžeme napsat:

$$I_a = \frac{U_a - U_z}{Z_a} \quad (11.7)$$

$$I_b = \frac{U_b - U_z}{Z_b} \quad (11.8)$$

Hodnota vyrovnávacího proudu je 5 – 10% jmenovitého proudu.

Směr proudu bude tedy dán rozdílem převodů transformátorů, charakter proudu bude dán jeho vnitřními impedancemi. [17]

Stejná napětí nakrátko

Tuto podmínku většinou nelze přesně splnit, protože mezi jednotlivými transformátory se napětí nakrátko bude vždy trochu lišit. Dovolená odchylka je $\pm 10\%$.

Při paralelní spolupráci dvou transformátorů s rozdílným napětím nakrátko zvýšíme postupně zatížení, až do chvíle, kdy velikost úbytku napětí na jednom transformátoru bude roven jeho napětí nakrátko. V této chvíli dosáhl transformátor svého jmenovitého zatížení a transformátor s vyšším napětím nakrátko je tedy zatěžován menším výkonem, než je jeho jmenovitý. Při dalším zvyšování zatížení, by docházelo k přetěžování transformátoru s menším napětím nakrátko a z toho plyne, že při nerovnosti napětí nakrátko jednotlivých transformátorů nedokážeme využít jejich maximální jmenovitý výkon a můžeme tyto transformátory snadno přetížit.

Při značném rozdílu napětí nakrátko, je možné zapojit tlumivku do série s transformátorem, který má menší napětí nakrátko. Lze také použít transformátory o různých převodech, tak aby transformátor s větším napětím nakrátko měl na výstupní straně větší napětí naprázdno. V tomto případě vzniká vyrovnávací proud, který odlehčuje přetížený transformátor a zatěžuje ten méně zatížený.

Při paralelní spolupráci transformátorů, pracujících ve větší vzdálenosti od sebe hraje nestejně napětí nakrátko menší roli (vlivem impedance vodičů). [6]

Při paralelním chodu transformátorů s rozdílným napětím nakrátko musí tato skupina přenést alespoň 95% součtového výkonu.

Stejné hodinové číslo

Shodnost fáze výstupních napětí lze splnit bez potíží u jednofázových transformátorů, problém nastává u transformátorů trojfázových, kde tuto podmínku nelze vždy splnit.

V praxi se nejčastěji objevují transformátory s hodinovými čísly 0; 1; 5; 6; 11. [6]

Při zapojení transformátorů s rozdílným hodinovým číslem vzniká fázový posun napětí a díky tomu vznikají vyrovnávací proudy, kde při rozdílu o 1 hodinu vzniká vyrovnávací proud až 25% jmenovitého proudu. Z toho plyne, že transformátory s rozdílným hodinovým číslem musí být správně zapojeny, jinak paralelní spolupráce není možná.

Poměr jmenovitých výkonů

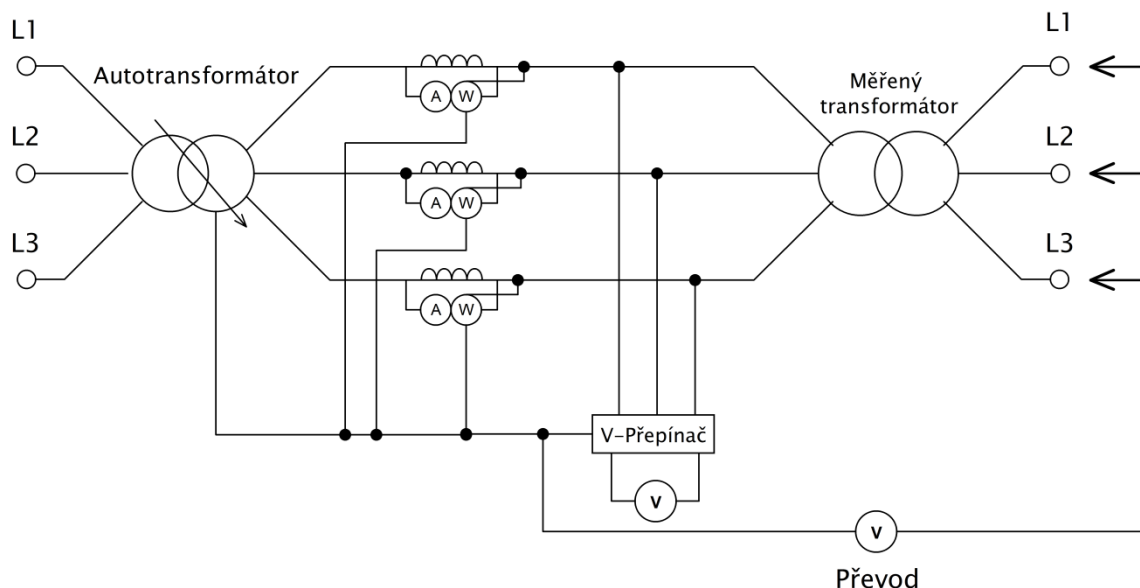
Paralelně spolupracující transformátory by se od sebe výkonově neměly lišit více než v poměru **1:3**. Pro dosažení dobrého využití jmenovitých výkonů transformátorů, je potřeba, aby transformátor s větším výkonem měl menší napětí nakrátko.

12. Měření transformátoru naprázdno

Štítek transformátoru:

Typ: TNC – 10
Výkon: 10000 VA
Zapojení: Yy0
Napětí: 3x380V
Krytí: IP00
Frekvence: 50Hz

12.1 Schéma zapojení:



Obr. 15 Schéma zapojení pro měření transformátoru naprázdno.

12.2 Postup měření

Měření probíhalo na měřicím pultu TSF s č. 3760/73. Nejprve jsem nastavil hodnotu napětí na přibližně 130% jmenovitého napětí a poté jsem snižoval hodnotu napětí o přibližně 20V. Odečítal jsem hodnoty fázových napětí, proudů a výkonů pro jednotlivé fáze až do 30% jmenovité hodnoty napětí. Při měření je třeba dávat si pozor na to, aby se při snižování napětí nevyjelo omylem nahoru, protože pak je třeba celé měření opakovat.

12.3 Tabulka naměřených hodnot:

Tab. 1 Tabulka hodnot naměřených při chodu naprázdno.

U_{1f} [V]	U_{2f} [V]	U_{3f} [V]	U_0 [V]	U_{sek} [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I_0 [A]	P_0 [W]	$\cos \varphi_k$ [-]	p [-]
271,89	271,80	274,13	472,17		1,79	1,82	1,24	1,61	230,45	0,175	
250,23	249,91	252,07	434,29		1,19	1,22	0,82	1,08	166,69	0,205	
232,44	232,58	234,07	403,62		0,83	0,85	0,57	0,75	129,35	0,247	
230,94	230,94	230,94	400,00		0,81	0,83	0,55	0,73	126,95	0,253	
219,39	219,39	219,39	380,00		0,63	0,64	0,43	0,57	108,46	0,297	
211,50	210,71	212,67	366,55	82,12	0,51	0,52	0,34	0,46	95,82	0,328	2,577
189,46	189,19	190,59	328,65	73,43	0,32	0,33	0,21	0,29	72,84	0,441	2,584
170,03	170,74	172,45	296,31		0,24	0,24	0,15	0,21	58,57	0,543	
149,72	150,05	151,11	260,32	58,42	0,19	0,19	0,12	0,17	45,65	0,596	2,573
134,63	134,72	136,12	234,10		0,16	0,16	0,10	0,14	37,43	0,659	
109,48	109,57	110,79	190,43	42,41	0,13	0,13	0,08	0,11	25,68	0,708	2,592
91,06	91,96	91,82	158,68		0,11	0,11	0,07	0,1	18,52	0,674	
67,70	67,81	68,63	117,86		0,09	0,08	0,05	0,07	10,85	0,759	
53,83	54,45	54,70	94,10		0,08	0,07	0,04	0,06	7,25	0,741	

12.4 Příklady výpočtu:

Střední hodnota napětí:

$$U_0 = \frac{\sqrt{3} \cdot (U_{1f} + U_{2f} + U_{3f})}{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot (219,39 + 219,39 + 219,39)}{3} = 380V \quad (12.1)$$

Střední hodnota proudů:

$$I_0 = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{0,63 + 0,64 + 0,43}{3} = 0,57A \quad (12.2)$$

Procentní proud naprázdno:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_N} = \frac{0,57}{15,19} \cdot 100 = 3,75\% \quad (12.3)$$

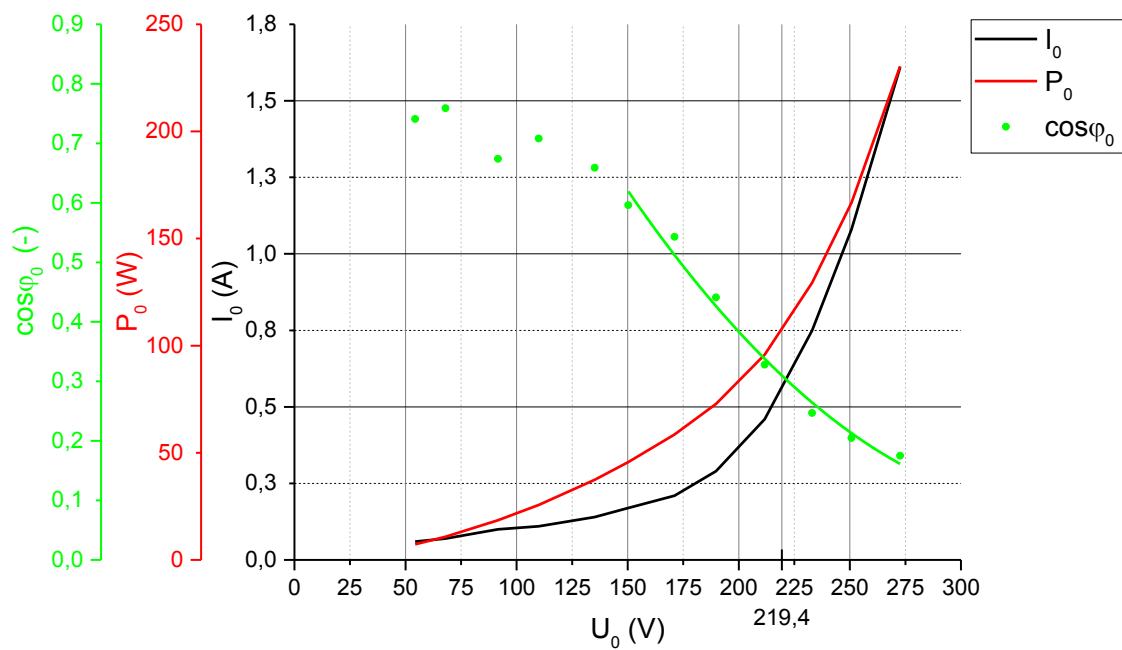
Účinník naprázdno:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_c}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot I_s} = \frac{108,46}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,57} = 0,289 \quad (12.4)$$

Převod transformátoru:

$$p = \frac{U_{1f}}{U_{2f}} = \frac{211,627}{82,12} = 2,577 \quad (12.5)$$

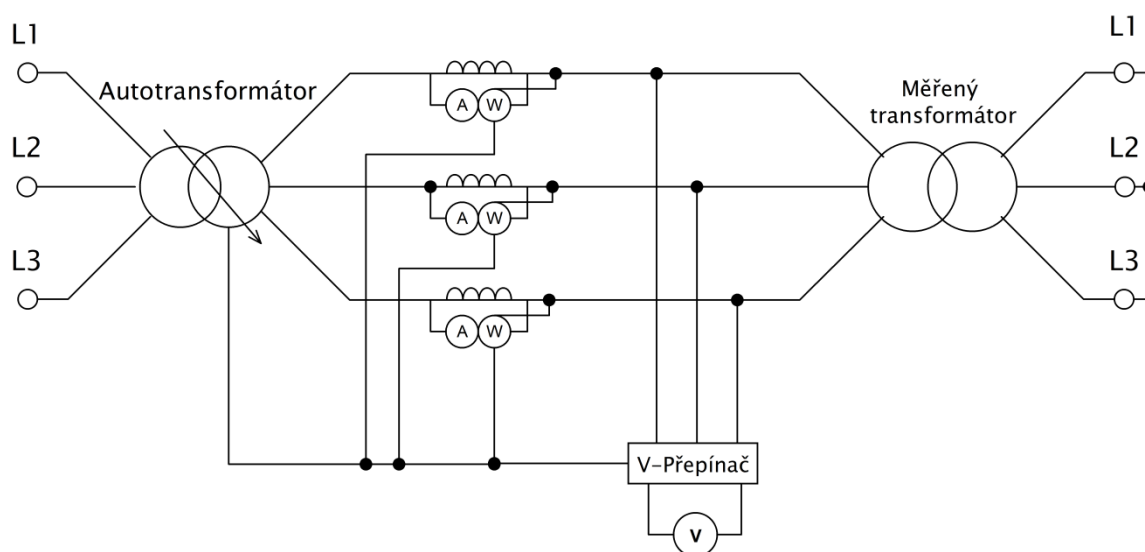
12.5 Vykreslení závislosti I_0 , P_0 , $\cos\varphi_0$



Obr. 16 Graf závislosti $I_0 = f(U_0)$, $P_0 = f(U_0)$ a $\cos\varphi_0 = f(U_0)$.

13. Měření transformátoru nakrátko:

13.1 Schéma zapojení:



Obr. 17 Schéma zapojení pro měření transformátoru nakrátko.

13.2 Postup měření

Pro měření nakrátko jsem vodičově propojil všechny tři fáze sekundárního vinutí. Nastavil jsem rozsahy wattmetrů a rozsahy měřících transformátorů proudu. Poté jsem nastavil napětí na transformátoru tak, aby jím protékal proud o přibližně 130% jmenovité hodnoty a snižoval jsem ho o ± 1 A až do 30% jmenovité hodnoty proudu. V průběhu měření je důležité hlídat rozsahy proudových transformátorů a wattmetrů a naměřené hodnoty přepočítávat pomocí převodových konstant.

13.3 Tabulka naměřených hodnot:

Tab. 2 Tabulka hodnot naměřených při chodu nakrátko.

U_{1f} [V]	U_{2f} [V]	U_{3f} [V]	U_k [V]	$u_k(\%)$	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I_k [A]	P_k [W]	$\cos \varphi_k$ [-]
12,68	13,76	13,56	23,09	6,08	17,48	18,78	17,61	17,96	645,32	0,898
11,64	12,75	12,31	21,19	5,56	16,07	17,01	15,93	16,33	537,51	0,897
10,88	11,86	11,65	19,85	5,21	14,90	15,77	14,92	15,19	469,41	0,898
10,67	11,62	11,47	19,49	5,12	14,58	15,43	14,64	14,88	450,89	0,898
9,63	10,50	9,73	17,08	4,49	12,90	13,91	12,25	13,02	348,52	0,905
8,27	9,23	8,51	15,01	3,95	10,84	12,16	10,59	11,20	261,00	0,896
7,13	8,11	7,48	13,11	3,45	9,04	10,62	9,15	9,60	195,30	0,896
6,08	6,40	5,92	10,62	2,79	7,28	8,28	7,05	7,54	122,98	0,887
4,60	4,92	4,35	8,00	2,11	4,88	6,18	5,00	5,35	64,98	0,877
3,93	4,06	3,47	6,62	1,74	3,69	5,07	3,93	4,32	41,51	0,838
3,32	2,67	1,92	4,56	1,2	2,37	3,27	2,03	2,56	16,22	0,802

13.4 Příklady výpočtu:

Střední hodnota napětí:

$$U_k = \frac{\sqrt{3} \cdot (U_{1f} + U_{2f} + U_{3f})}{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot (10,83 + 11,81 + 11,61)}{3} = 19,77V \quad (13.1)$$

Procentní napětí nakrátko:

$$u_{k\%} = \frac{U_k}{U_N} \cdot 100 = \frac{19,85}{380} \cdot 100 = 5,21\% \quad (13.2)$$

Zkratový proud protékající transformátorem při napájení U_N :

$$I_{kN} = \frac{I_N}{u_k} \cdot 100 = \frac{15,19}{5,21} \cdot 100 = 291,55A \quad (13.3)$$

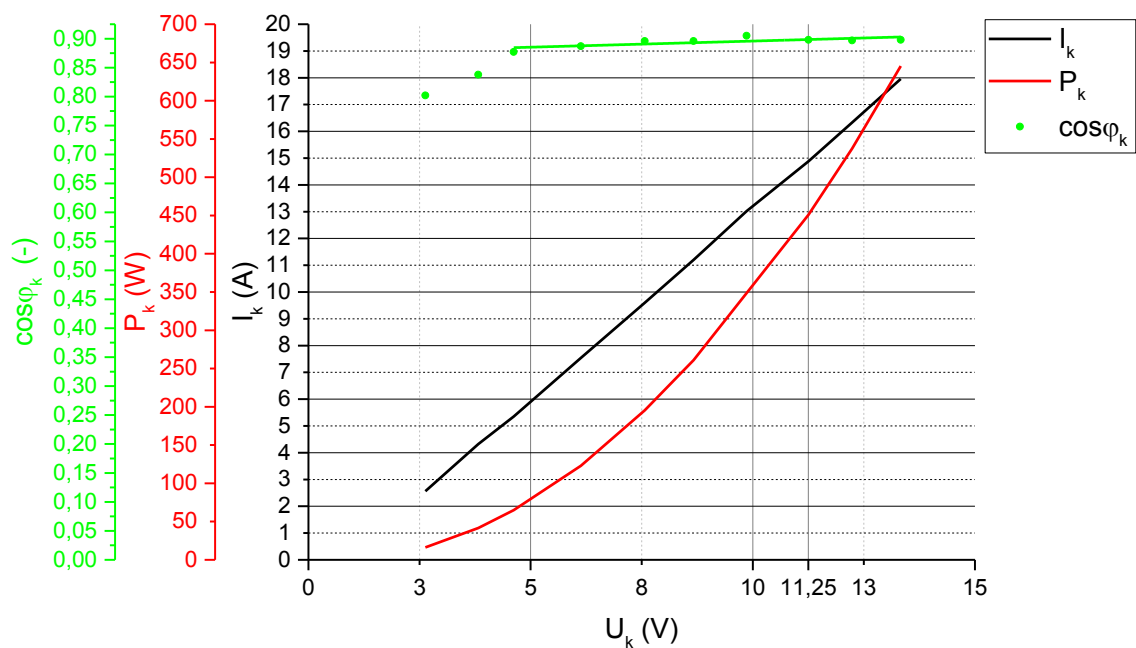
Střední hodnota proudů:

$$I_k = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} = \frac{14,90 + 15,77 + 14,92}{3} = 15,19A \quad (13.4)$$

Účinník nakrátko:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_k} = \frac{469,41}{\sqrt{3} \cdot 19,85 \cdot 15,19} = 0,898 \quad (13.5)$$

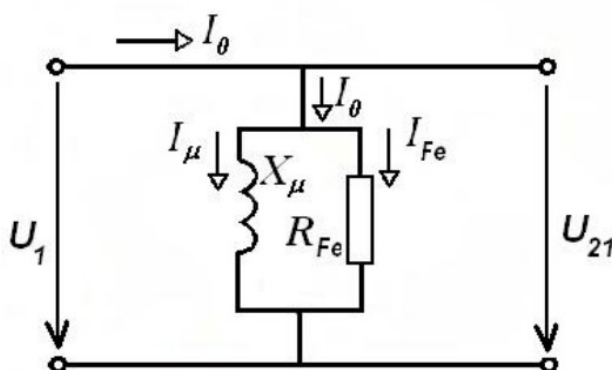
13.5 Vykreslení závislosti I_k , P_k , $\cos \varphi_k$



Obr. 18 Graf závislosti $I_k = f(U_k)$, $P_k = f(U_k)$ a $\cos \varphi_k = f(U_k)$.

14. Výpočet parametrů náhradního schéma transformátoru

14.1 Výpočet příčné větve (Chod naprázdno)



Obr. 19 Náhradní schéma transformátoru pro měření naprázdno.

Velikost magnetizačního proudu:

$$I_{\mu} = I_0 \cdot \sin \varphi_0 = 0,57 \cdot \sin(72,72) = 0,544 A \quad (14.1)$$

Velikost proudu zahrnujícího ztráty v železe:

$$I_{Fe} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 = 0,57 \cdot 0,297 = 0,169 A \quad (14.2)$$

Impedance transformátoru naprázdno:

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 0,57} = 384,9 \Omega \quad (14.3)$$

Odpor magnetizačních ztrát:

$$R_{Fe} = \frac{Z_0}{\cos \varphi_0} = \frac{384,9}{0,297} = 1295,96 \Omega \quad (14.4)$$

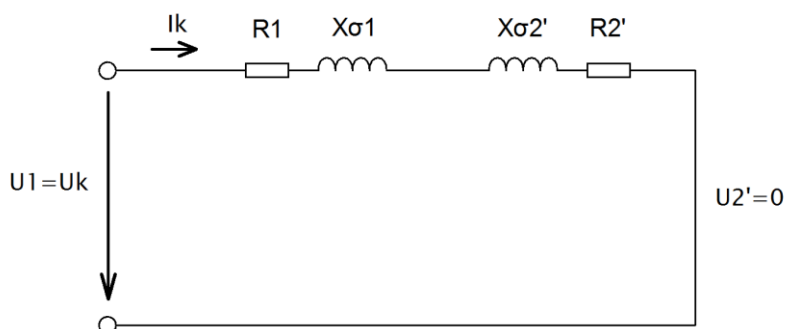
Magnetizační reaktance:

$$X_{\mu} = \frac{Z_0}{\sin \varphi_0} = \frac{384,9}{\sin(72,72)} = j403,08 \Omega \quad (14.5)$$

Ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = R_{Fe} \cdot I_{Fe}^2 = 1295,96 \cdot 0,169^2 = 37,01 W \quad (14.6)$$

14.2 Výpočet podélné větve (Chod nakrátko)



Obr. 20 Náhradní schéma transformátoru pro měření nakrátko.

Impedance nakrátko:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{19,85}{\sqrt{3} \cdot 15,19} = 0,755 \Omega \quad (14.7)$$

Odpor vinutí:

$$R_k = Z_k \cdot \cos \varphi_k = 0,755 \cdot 0,898 = 0,678 \Omega \quad (14.8)$$

Rozptylová reaktance:

$$X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k = 0,755 \cdot 0,439 = j0,332 \Omega \quad (14.9)$$

Výpočet odporu vinutí:

Předpokládáme $R_1 = R_2$

$$R_1 = \frac{R_k}{2} = \frac{0,678}{2} = 0,339 \Omega \quad (14.10)$$

$$R_2' = R_2 \cdot \frac{1}{p^2} = 0,339 \cdot \frac{1}{2,577^2} = 0,051 \Omega \quad (14.11)$$

Výpočet Rozptylové reaktance vinutí:

Předpokládáme $X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}$

$$X_{\sigma 1} = \frac{X_k}{2} = \frac{0,332}{2} = j0,166 \Omega \quad (14.12)$$

$$X_{\sigma 2}' = X_{\sigma 2} \cdot \frac{1}{p^2} = 0,166 \cdot \frac{1}{2,577^2} = j0,025 \Omega \quad (14.13)$$

15. Simulace v ATP

15.1 O programu ATP

Alternative Transients Program zkratkou ATP je plně vybavený program pro simulaci elektrických výkonových systémů, rovněž je schopen simulovat řízení, výkonovou elektroniku a další hybridní situace zahrnující výše uvedené.

Práci v programu ATP usnadňují předem navržené obvodové prvky, do kterých je po otevření možno nastavit jejich příslušné hodnoty a po spuštění simulace si lze prohlédnout nasimulované průběhy pomocí podprogramu MC's PlotXY.

15.2 Nastavení obvodových prvků

Pro tuto simulaci jsem si zvolil model transformátoru typu Saturable 3 Phase.

15.2.1 Nastavení simulovaných transformátorů



Po otevření modelu se objeví tabulka, kde se zadají parametry náhradního schématu, které jsem si pro tento experiment vypočítal, z naměřených hodnot.

Transformátor, na kterém jsem prováděl měření naprázdno a nakrátko je dimenzován na jmenovité napětí 380V. U měření naprázdno jsem určil převod transformátoru na $p = 2,58$ a tedy:

$$U_{sek} = \frac{U_N}{p} = \frac{380}{2,58} = 147,28V \quad (15.1)$$

Attributes		Characteristic	
	Prim.	Sec.	
U [V]	380	147.28	
R [ohm]	0.339	0.051	
L [mH,ohm]	0.166	0.025	
Coupling Y Y			
Phase shift 0			
I(0)= 0.57	Rm= 1295.96	<input type="checkbox"/> 3-leg core	
F(0)= 0.875617		<input type="checkbox"/> RMS	
		<input type="checkbox"/> 3-winding	

NODE	PHASE	NAME
Primary	ABC	PT1
Secondary	ABC	ST1
Starpoint	ABC	X0011
Prim-N	1	
Sec-N	1	

Obr. 21 Nastavení parametrů modelovaného transformátoru.

V první tabulce jsem nastavil napětí na primární a sekundární straně a následně jsem dosadil velikosti odporů a reaktancí podélné větve náhradního schématu.

Jako další jsem nastavil coupling, zde se zadá, zda byl transformátor zapojen do hvězdy, trojúhelníku nebo lomené hvězdy. Mnou měřený transformátor byl zapojen jako Yy0, čili do Phase dosadíme nulový fázový posun.

Posledními parametry potřebnými k nastavení na stránce Attributes jsou proud naprázdno $I(0)$, který jsem vypočítal dle rovnice (12.2), odpor R_m , jenž odpovídá odporu v železe R_{Fe} což je v mém případě 1295,96 dle rovnice (14.4) a v neposlední řadě jsem nastavil $F(0)$, který reprezentuje magnetický tok při chodu naprázdno.

V záložce Characteristic se nastavuje závislost magnetického toku na proudu.

Hodnoty pro tuto charakteristiku jsem dostal za pomoci modelu transformátoru BCTRAN, kde jsem nastavil naměřené hodnoty a poté pomocí Copy+ zkopíroval potřebné hodnoty.

Attributes	Characteristic
Saturation (on the PRIMARY winding!)	
I [A]	Fluxlinked [Wb-T]
0.18145609879	0.60600114583
0.24613017862	0.67394912307
0.29119608768	0.76540235988
0.48805535841	0.85290513289
0.84580718892	0.95206177409
1.1453237987	0.98761594823

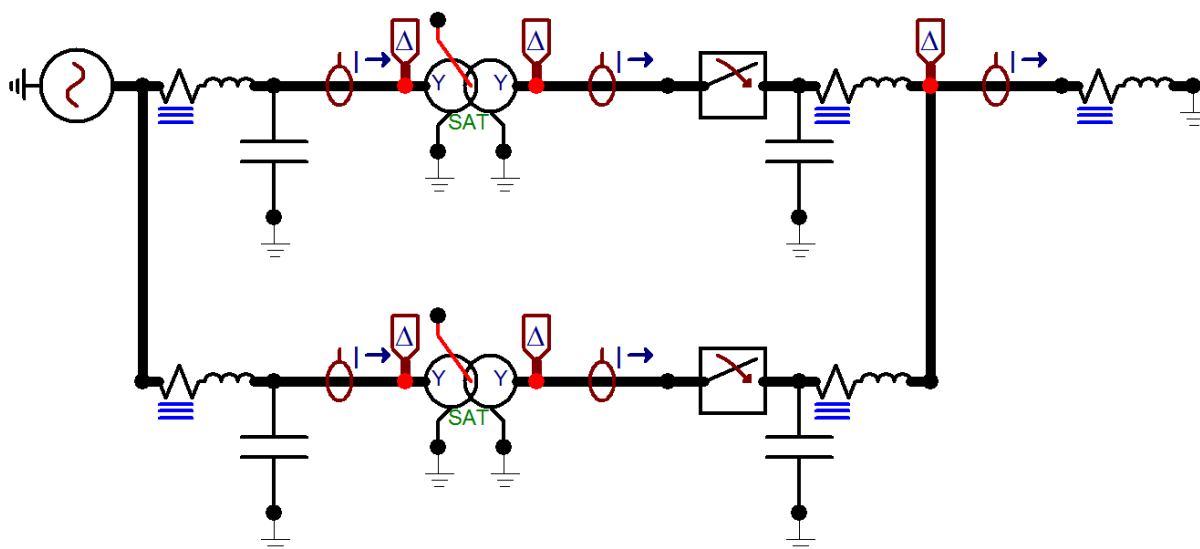
Obr. 22 Nastavení saturační charakteristiky modelu transformátoru.

15.2.2 Nastavení parametrů vedení

Aby se experimentální simulace přiblížila reálným podmínkám, je zapotřebí nastavit parametry vedení. Pro simulaci parametrů vedení jsem nastavil obecnou RLC zátěž, kde pro vstupní vedení jsem volil hodnotu odporu $R = 0,7\Omega$, velikost indukce $L = 0,004\text{mH}$ a kapacitu $C = 0.04\mu\text{F}$. Pro výstupní vedení jsem volil velikost hodnot $R = 0,25\Omega$, $L = 0,003\text{mH}$ a $C = 0.09\mu\text{F}$.

15.2.3 Nastavení parametrů zátěže

Bylo také zapotřebí nastavit velikost napájené zátěže, pro mou simulaci jsem zvolil obecnou RL zátěž, kterou jsem nastavil tak, aby při chodu jednoho transformátoru odebírala jeho jmenovitý proud. Nastavené hodnoty jsem zvolil $R = 1,73\Omega$ a $L = 2\text{mH}$.

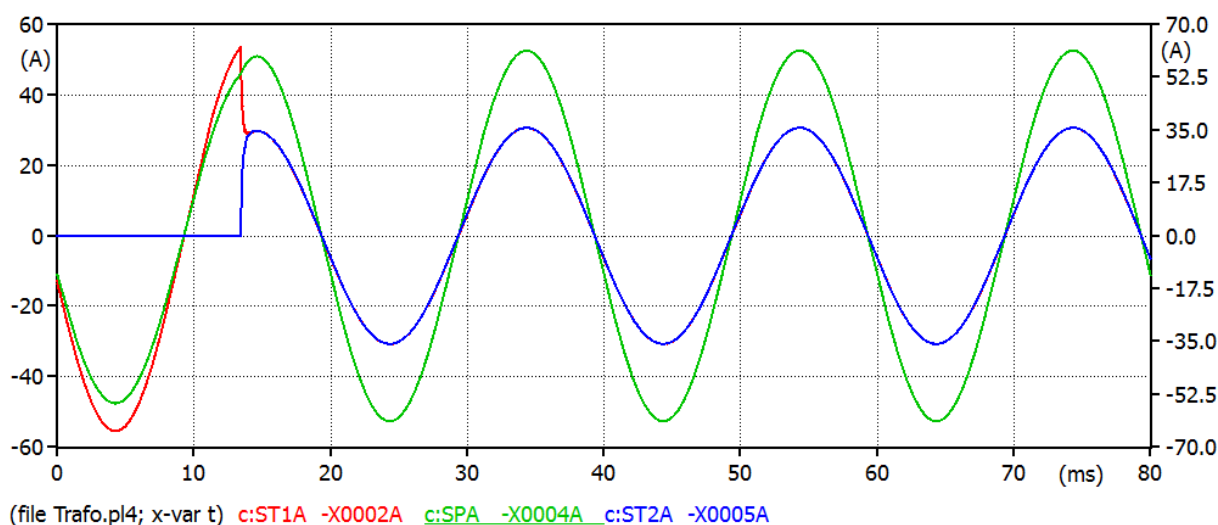


Obr. 23 Celkové simulační schéma.

15.3 Ideální stav paralelního chodu

Vrchní transformátor jsem si označil jako T_1 a je připojen na síť od začátku simulace. Čas simulování je nastaven na 0.08, což při frekvenci 50Hz odpovídá čtyřem periodám. V čase 0.0134 sepne vypínač a k síti se připojí transformátor T_2 . Tento čas jsem volil tak, aby proud transformátoru T_1 byl přibližně ve svém maximu ve fázi A. Červené uzly před zapojenými A-metry jsem si pro lepší orientaci v průbězích označil jako **ST1**, neboli S - Sekundár, T - Transformátor 1 a **ST2**, neboli S - Sekundár, T - Transformátor 2. Poslední červený uzel v modelu je označen jako **SP** neboli S - Společný, P - Proud. Společný proud je v mých simulacích vždy zeleně a je vykreslen na samostatnou Y osu nacházející se vpravo.

V první části simulace jsem namodeloval ideální stav, kdy jsou oba transformátory parametrově totožné.



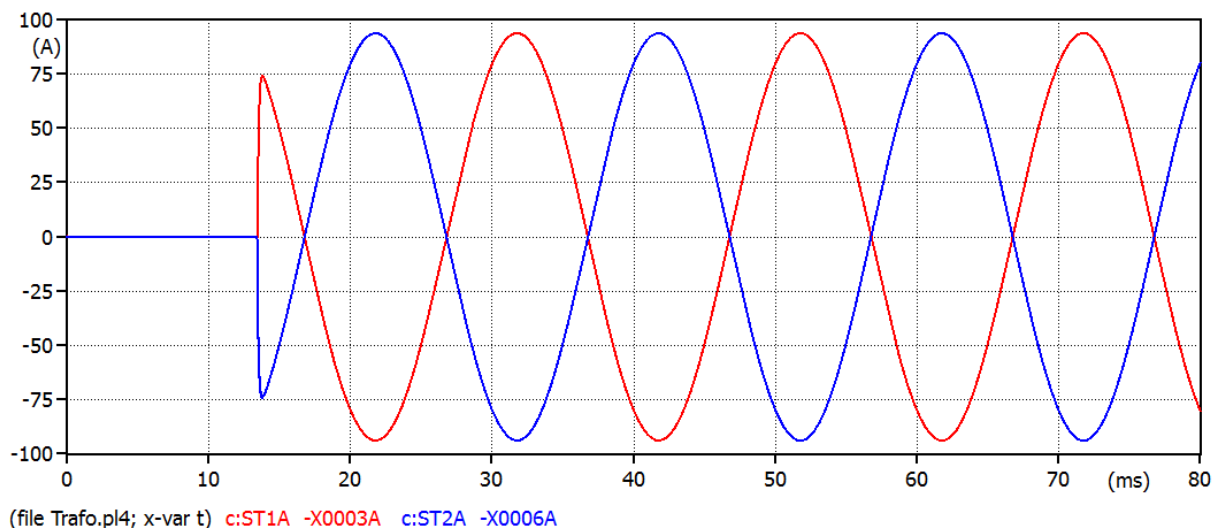
Obr. 24 Ideální stav - Průběh proudů ve fázi A na sekundární straně.

Touto simulací jsem si ověřil své předpoklady, a to že po sepnutí spínače a následném krátkém přechodovém ději převezme druhý transformátor přibližně polovinu výkonu, proud tekoucí transformátorem T_1 se zmenšil z hodnoty 55,45A na hodnotu 30,7A. Celkový proud odečtený z průběhu SPA je 61.4A a stoupl tedy přibližně o 5,95A, to je způsobeno snížením celkové impedance obvodu po zapojení druhého transformátoru.

15.4 Zapojení Yd fázový posun o 1 hodinu (30°)

V simulaci se zaměřuji na připojení transformátoru, který bude fázově posunut o 1 hodinu. Toho docílíme pouze tehdy, bude-li připojovaný transformátor na sekundární straně zapojen do trojúhelníku.

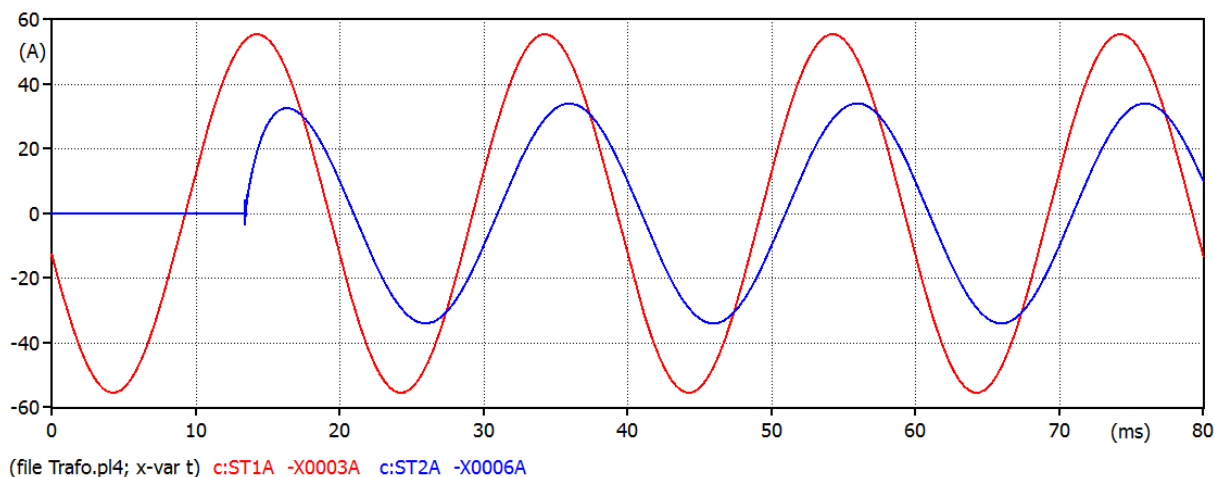
V první části nasimuluji průběh vyrovnávacího proudu, tekoucího obvodem při chodu naprázdno.



Obr. 25 Průběh vyrovnávacího proudu při fázovém posunu 1h.

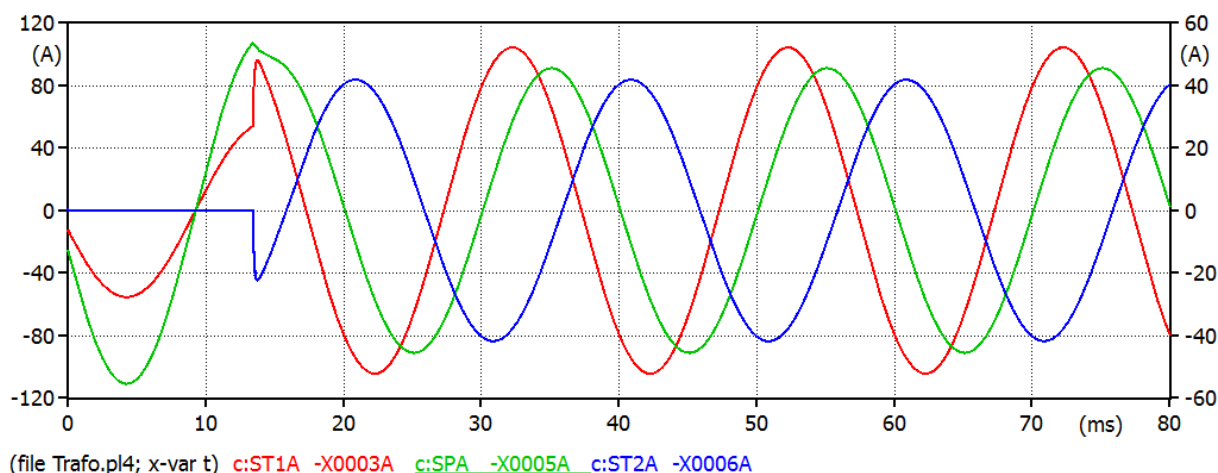
Velikost vyrovnávacího proudu je 93,83A. Tento proud je dán napěťovou nesymetrií, vnitřní impedancí transformátoru a impedancí vedení. Při zanedbání impedance vedení dosahuje vyrovnávací proud velikosti 134,88A.

Další simulace je vykreslení průběhů proudu, kdy transformátory dodávají výkon do své vlastní zátěže a nejsou tak propojeny.



Obr. 26 Vykreslení průběhů proudů, kdy transformátory dodávají proud do své zátěže.

Tento průběh vykresluji, aby bylo zřetelnější, co se stane, když začne protékat vyrovnávací proud.



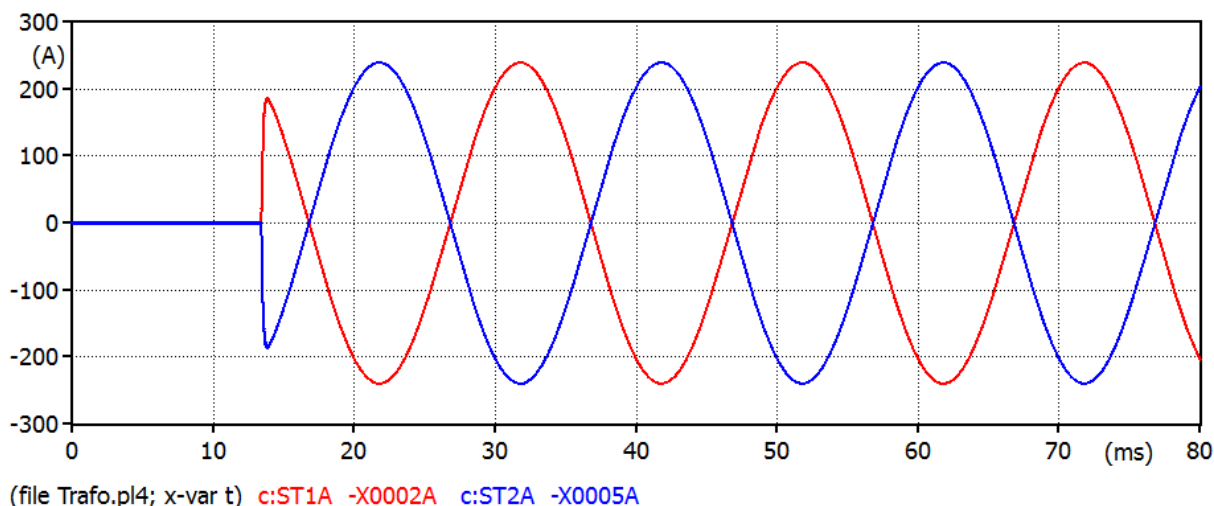
Obr. 27 Průběh výsledných proudů pro zapojení T_1 Yy0 a T_2 Yd1.

Hodnota proudu tekoucího transformátorem T_1 stoupla z hodnoty 55,46A na hodnotu 104,4A. Velikost proudu tekoucího transformátorem T_2 je 83,58A a velikost výsledného proudu klesla z hodnoty 55,46A na hodnotu 45,56A. Z průběhů je zřejmé, že vyrovnávací proud se přičítá k proudu daným zátěží a nerovnoměrně tak zatěžuje transformátory. Dále posunuje fázi těchto proudů a ve výsledku také snižuje celkový proud tekoucí zátěží.

15.5 Zapojení Yy fázový posun o 4 hodiny (120°)

Pro tuto simulaci jsem se rozhodl nastavit hodinové číslo připojovaného transformátoru na Yy4 a připojit jej k transformátoru s hodinovým číslem Yy0. K tomuto posunu by v praxi mohlo dojít cyklickou záměnou svorek, viz Obr. 13.

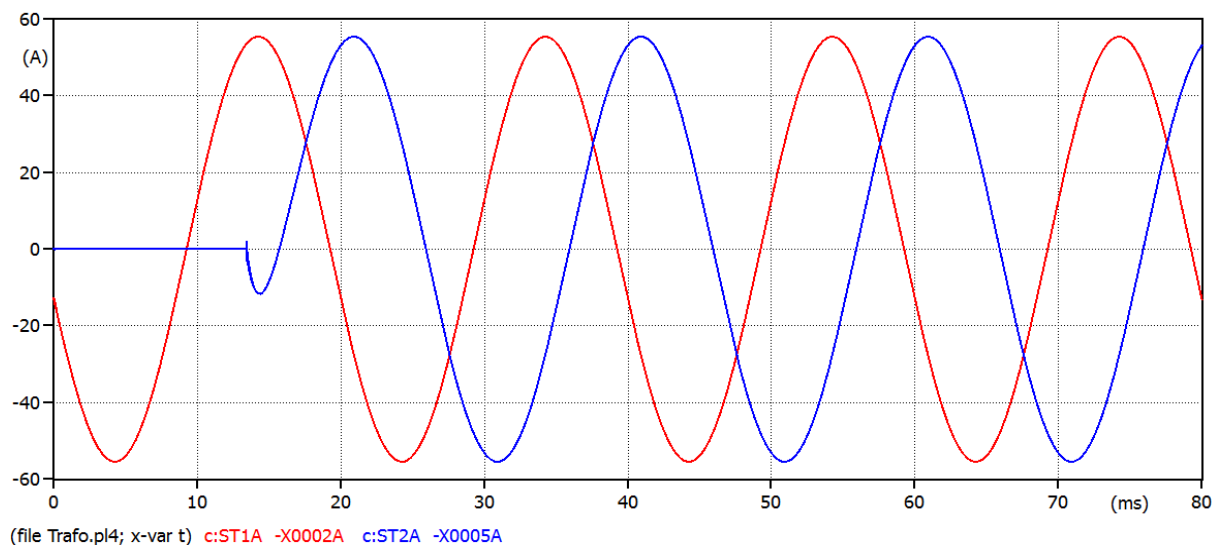
Jako první jsem nasimuloval průběh samotného vyrovnávacího proudu při chodu naprázdno.



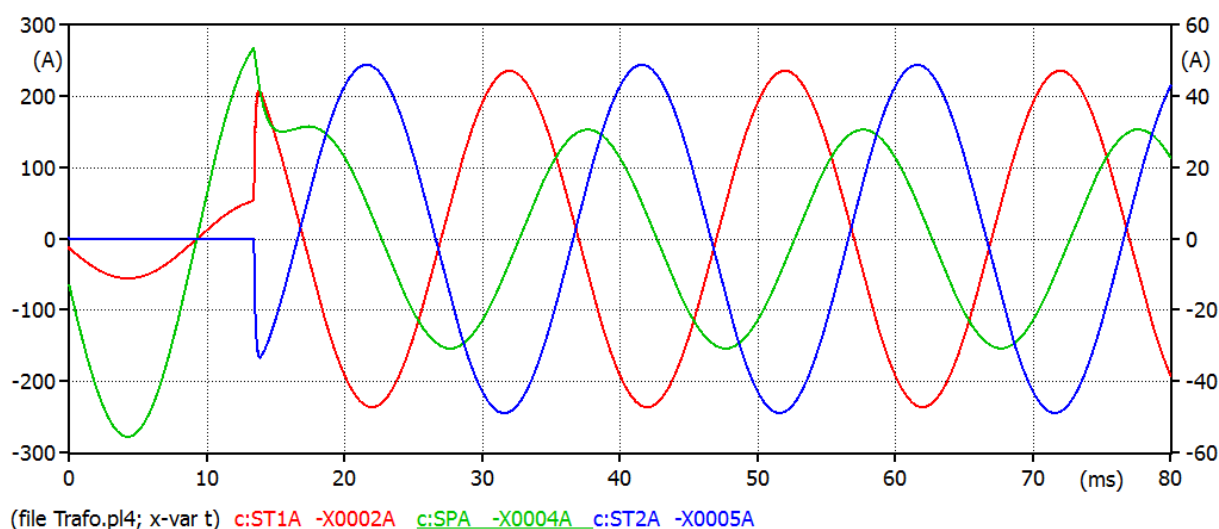
Obr. 28 Průběh vyrovnávacího proudu při chodu naprázdno při fázovém posunu o 4h.

Velikost vyrovnávacího proudu je 239,6A. Vyrovnávací proud je v tomto případě téměř 2,6x větší, než při fázovém posunu o 1h a je přibližně 4,34x větší než jmenovitý proud. Tento proud se blíží vypočítanému maximálnímu zkratovému proudu, viz rovnice (13.3). V tomto případě se tedy jedná o zkrat transformátoru na výstupu.

Vykreslení průběhů proudů, kdy transformátory nejsou propojeny a dodávají výkon do své vlastní zátěže.



Obr. 29 Průběh proudů, kdy transformátory dodávají proud do své zátěže.

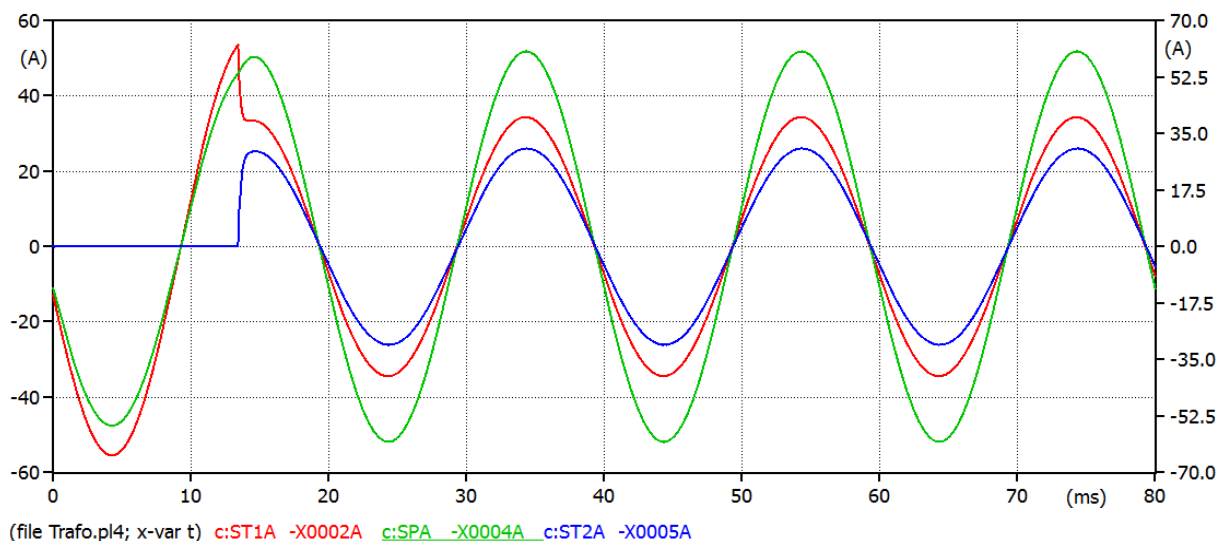


Obr. 30 Průběh výsledných při zapojení T_1 Yy0, T_2 Yy4.

Po připojení transformátoru T_2 jím začal protékat proud 244,04A a proud tekoucí transformátorem T_1 stoupl na hodnotu 235,6A. Výsledný proud tekoucí zátěží je 30,68A. Z průběhů je patrné, že vyrovnávací proud zvýšil celkové zatížení transformátorů. Protože je vyrovnávací proud dán podélnou větví transformátoru, tak je jeho charakter induktivní a proto fázově posouvá průběhy proudů a ve výsledku snížil celkový proud tekoucí zátěží.

15.6 Připojení transformátoru s rozdílným napětím nakrátko

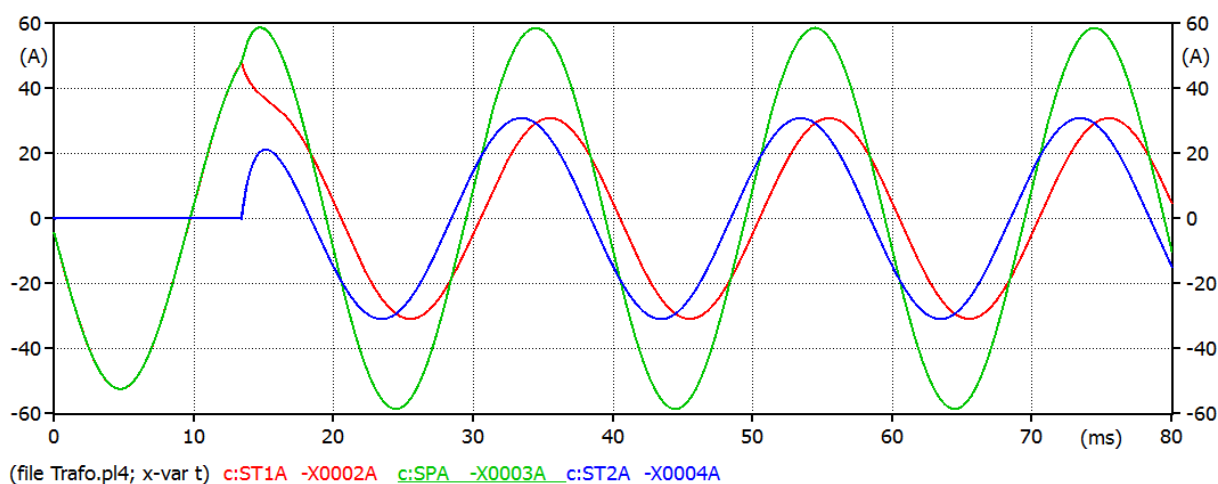
V této části simuluji vliv rozdílného napětí nakrátko, při paralelním chodu. Pro připojovaný transformátor uvažuji napětí nakrátko 12,5%. Pro toto napětí jsem si dle vztahů uvedených v kapitole pro výpočet náhradního schématu vypočítal parametry prvků a dosadil do modelu transformátoru.



Obr. 31 Průběh výsledných proudů při rozdílném napětí nakrátko.

Touto simulací jsem ověřil, že transformátor s nižším napětím nakrátko převezme větší výkon, což by v případě, kdy transformátory neběží na plný výkon, nebyl problém, ale pokud bychom chtěli zvýšit výkon na jmenovitý, tak budeme omezeni napětím nakrátko transformátoru T_1 . Velikost proudu transformátoru T_1 je 34,4A, velikost proudu tekoucího transformátorem T_2 je 26,1A a výsledný proud tekoucí zátěží je pak 60,49A.

Tyto výchylky proudu lze vykompenzovat přidáním tlumivky do obvodu transformátoru s nižším napětím nakrátko a zvýšit tak jeho impedanci.



Obr. 32 Průběh výsledných proudů po kompenzaci rozdílného $u_k\%$ tlumivkou.

Po zařazení tlumivky s indukčností $L = 1,198\text{mH}$ do obvodu za transformátor T_1 se velikost proudů vyrovnala a transformátory teče proud 30,9A, výsledný proud zátěží je pak 58,6A. Nevýhodnou přidání tlumivky je, že se zvýší induktivní reaktance obvodu a dojde k fázovému posunu mezi proudy, což ve výsledku sníží výsledný proud. Za další nevýhodu můžeme považovat zvýšené ztráty způsobené na tlumivce.

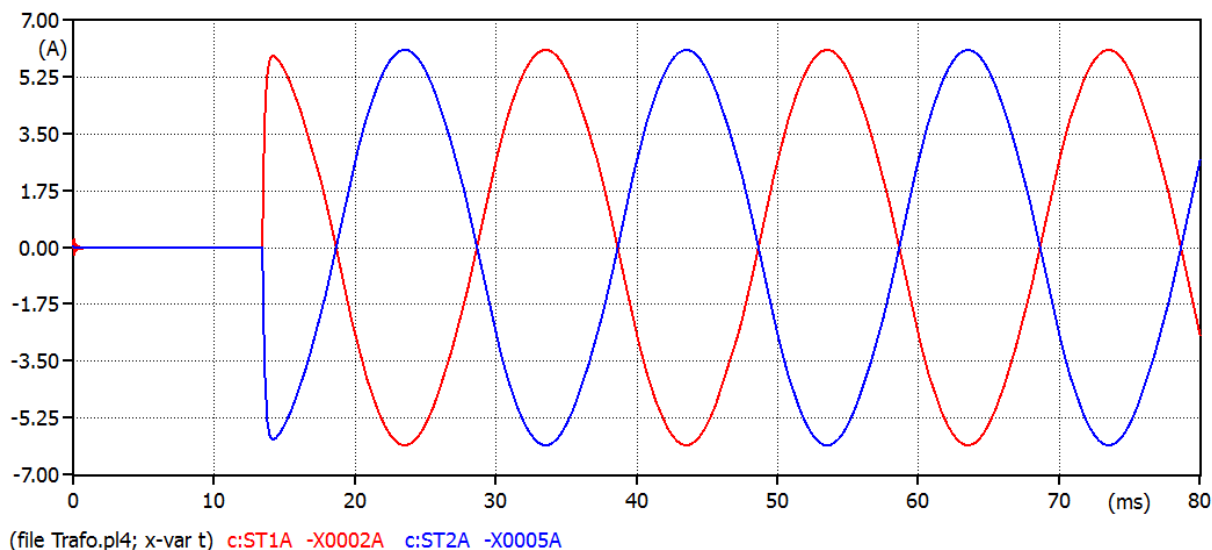
15.7 Připojení transformátoru s rozdílným převodem a napětím nakrátko.

V poslední simulaci se zaměřuji na připojení transformátoru o rozdílném napětí nakrátko a rozdílném převodu.

15.7.1 Transformátor s menším převodem

Transformátor T_2 má převod $p = 2,71$ a procentní napětí nakrátko $u_{k\%} = 12.5\%$.

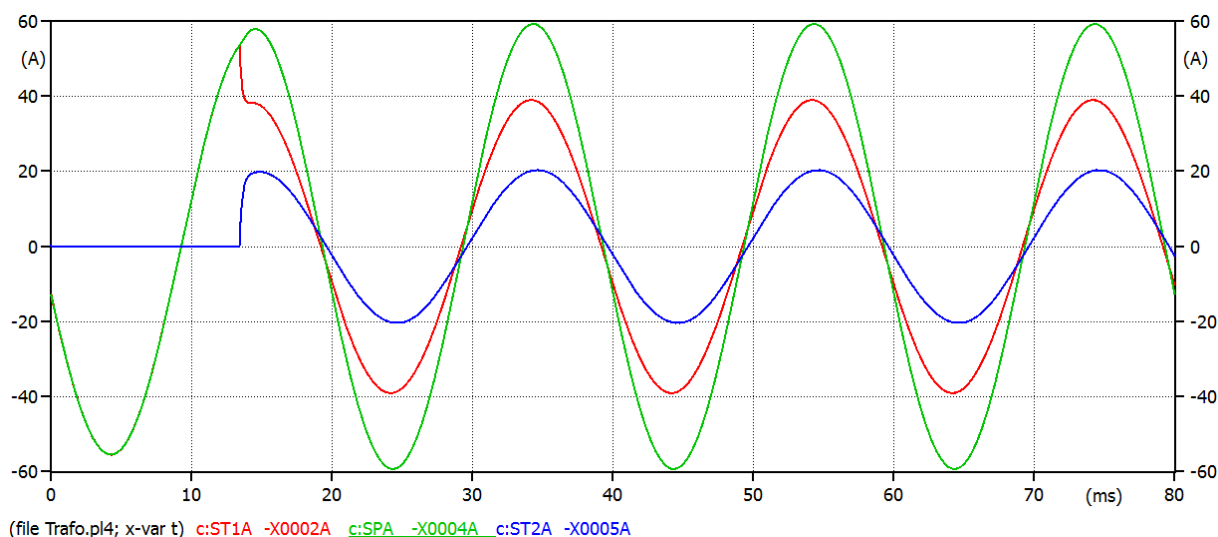
Jako první simuluji připojení takového transformátoru naprázdno.



Obr. 33 Průběh vyrovnávacího proudu při rozdílném p a $u_{k\%}$.

Vidíme, že transformátorem protéká vyrovnávací proud, který se vytvořil z důvodu napěťové nesymetrie. Jeho velikost je 6,09A a je snížena vlivem impedance vedení. Bez uvažování impedance vedení dosahoval tento proud velikosti 11.74A.

V dalším kroku je nasimulováno, co se stane, pokud takovýto transformátor připojíme k zátěži.



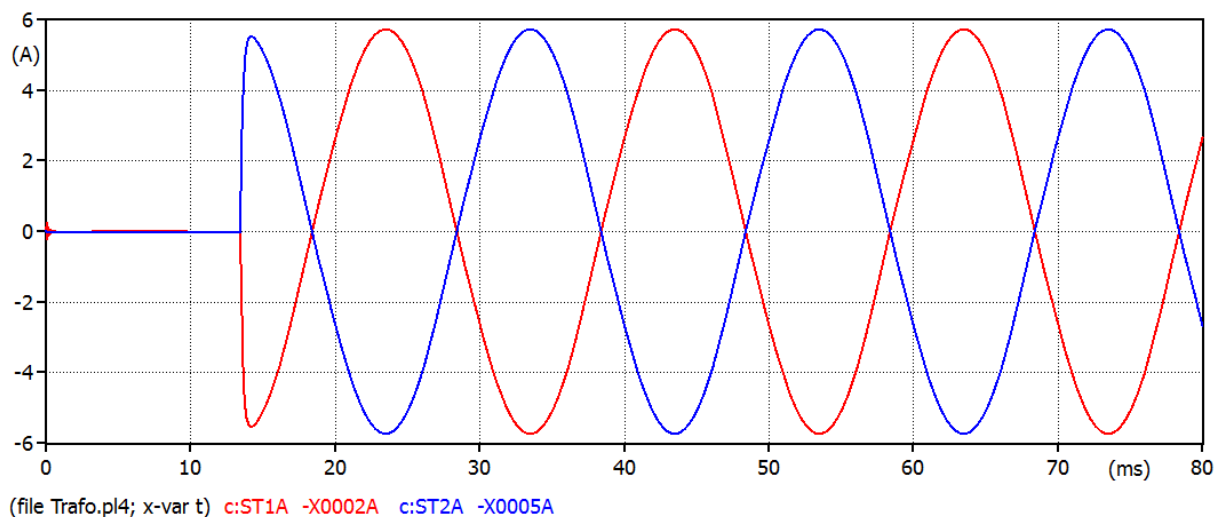
Obr. 34 Průběh výsledných proudů při připojení k zátěži.

Je zřejmé, že proud tekoucí transformátorem T_1 se snížil z hodnoty 55,44A na hodnotu 39,06A. Proud dodávaný transformátorem T_2 nabývá hodnoty 20,37A. Výsledný proud transformátorem je pak součet těchto dvou proudů a nabývá hodnoty 59,30A.

15.7.2 Transformátor s větším převodem

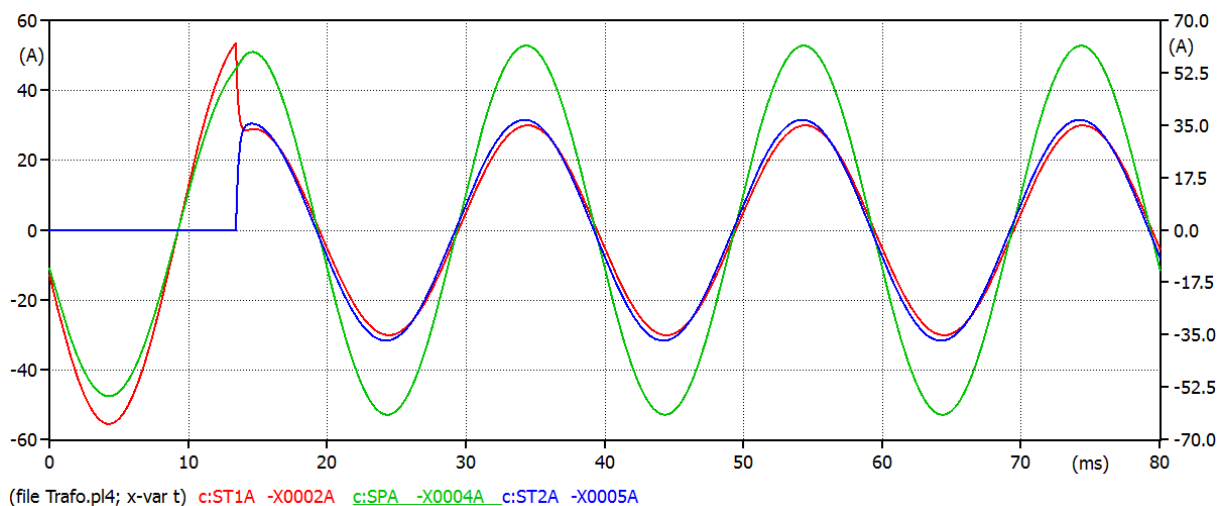
Touto simulací předvedu, jak se změní proudové poměry, pokud připojovaný transformátor bude mít větší převod, než je převod transformátoru T_1 . Převod jsem v této části zvýšil oproti transformátoru T_1 o stejnou velikost, o jakou jsem ho v předchozí části snížil, tedy převod transformátoru T_2 je 2,46, $u_k\%$ zůstává stejné.

Připojením takového transformátoru při chodu naprázdno vidíme, že vyrovnávací proud začal protékat fázově otočený o 180° .



Obr. 35 Průběh vyrovnávacího proudu při rozdílném p a $u_k\%$.

Velikost vyrovnávacího proudu je 5,73A. Bez uvažování vlivu impedance vedení nabývá proud hodnoty 10,64A.



Obr. 36 Průběh výsledných proudů při větším převodu a stejném $u_k\%$.

Z nasimulovaného průběhu lze vyčíst, že proud tekoucí transformátorem T_1 klesl z hodnoty 55,44A na hodnotu 30,05A a proud tekoucí transformátorem T_2 je 31,62A. Celkový proud pak nabývá hodnoty 61,63A. Je zřejmé, že vyrovnávací proud v tomto případě odlehčuje transformátor T_1 a zatěžuje transformátor T_2 . Tento stav není ideální, ale je lepší než v předchozím případě. Nicméně tyto transformátory bychom neměli provozovat, protože jejich převody se liší o více než 0,5%.

16. Vyhodnocení výsledků simulací

Tab. 3 Tabulka výsledných hodnot získaných simulacemi.

č.	Zapojení	$I_{T1}[A]$	$I_{T2}[A]$	$I_Z[A]$	$I_v[A]$
1	Ideální chod	30,7	30,7	61,4	0
2	Yy0, Yd1	104,4	83,58	45,56	93,83
3	Yy0, Yy4	235,6	244,04	30,68	239,6
4	$u_{k\%} = 12,5\%$	34,4	26,1	60,49	0
5	$u_{k\%} = 12,5\%$, $L = 1,83mH$	30,9	30,9	58,6	0
6	$u_{k\%}, p = 2,71$	39,06	20,37	59,3	6,09
7	$u_{k\%}, p = 2,46$	30,05	31,62	61,63	5,73

Při porovnání hodnot č. 2 s ideálním stavem můžeme vidět, že nejméně příznivý stav nastává při nestejném hodinovém úhlu, kde transformátorem protéká téměř zkratový proud, v mém případě snížený vlivem impedance vedení. Dále pak můžeme vidět, že vyrovnávací proud je při posunu o 4h přibližně 2,6x větší, než vyrovnávací proud při posunu o 1h. Samotnými transformátory pak protékal proud téměř 4,4x větší než proud jmenovitý.

Při porovnání hodnot č. 4 a č. 5 můžeme vidět, že lze tlumivkou vyrovnat rozdílné napětí nakrátko za cenu zvýšení fázového posunu mezi proudy a tím pádem také snížení velikosti proudu protékajícího zátěží. Proud v zátěži poklesl o 1,89A oproti stavu č. 4 a o 2,8A oproti ideálnímu chodu.

Porovnáním hodnot č. 4 a 6 vidíme, že vlivem napěťové nesymetrie, začal transformátory protékat vyrovnávací proud o velikosti 6,09A. Tento proud zvýšil celkový proud tekoucí transformátorem T_1 a o přibližně stejnou velikost snížil proud tekoucí transformátorem T_2 .

Porovnáním hodnot č. 4 a 7 je zřejmé, že pokud bude mít transformátor s větším napětím nakrátko větší převod, tak vzniká vyrovnávací proud, který odlehčuje transformátor s nižším napětím nakrátko a zatěžuje transformátor s větším napětím nakrátko.

Výstupy ze simulace se od naměřených hodnot mohou lišit z důvodu nepřesnosti při měření, vlivem magnetizační křivky, kterou si model transformátoru vypočítá a také vlivem nepřesností při výpočtech.

17. Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo především nasimulování a vyhodnocení průběhů paralelního chodu transformátorů, jejichž parametry se shodují s parametry reálného transformátoru. V práci jsou prezentovány jak naměřené hodnoty transformátoru, tak výsledné nasimulované průběhy situací, ve kterých transformátory nelze provozovat. Součástí práce je zároveň nasimulování situace, kdy lze použít tlumivku k vykompenzování nestejného napětí nakrátko. Zahrnutá je také teoretická část, kterou jsem zpracoval za pomoci znalostí získaných během svého studia a prostudováním příslušné literatury.

Za pomoci programu ProfiCAD byly vytvořeny schémata zapojení pro měření transformátorů naprázdno, nakrátko, pro samotné měření paralelního chodu a v neposlední řadě schéma pro odvození vyrovnávacího proudu při nestejném napětí na sekundární straně.

Největší přínos mé práce vidím ve tvorbě simulačního modelu, který může být nápomocen při hlubším studiu provozních stavů paralelně pracujících transformátorů, zejména pak stavů, které nelze v praxi z provozních důvodů měřit. Vytvořený model, který je součástí přiloženého CD, je velmi univerzální, variabilní a lze jej v případě potřeby jednoduše upravit vlastní potřebě a studiu dalších provozních stavů, kterými se nebylo možné z důvodu omezeného rozsahu práce zabývat.

Případným zájemcům o toto téma, bych doporučil zaměřit se na paralelní spolupráci více transformátorů do společné sítě, případně se zaměřit na paralelní chod transformátorů s třemi vinutími.

18. Seznam literatury

- [1] Hans Christian Oersted. *Famous Scientists* [online]. 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.famousScientists.org/hans-christian-oersted/>
- [2] Joseph Henry. *Edison Tech Center* [online]. Edison Tech Center, 2014 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://www.edisontechcenter.org/JosephHenry.html>
- [3] Hans Christian Oersted. *Famous Scientists* [online]. 2015 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://www.famousScientists.org/hans-christian-oersted/>
- [4] AC Power History and Timeline. *Edison Tech Center* [online]. Edison Tech Center, 2014 [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: <http://www.edisontechcenter.org/AC-PowerHistory.html>
- [5] The History of Electrification. *Edison Tech Center* [online]. Edison Tech Center, 2014 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.edisontechcenter.org/HistElectPowTrans.html>
- [6] JEZIERSKI, Eugeniusz. *Transformátory: teoretické základy*. Praha: Academia, 1973.
- [7] PETROV, G. *Elektrické stroje 1: úvod - transformátory*. Vyd. 1. Přeložil Břetislav BENDA. Praha: Academia, 1980. ISBN 21-045-80.
- [8] Transformátory 1. díl: Transformátory. *Elektro Bastlírna* [online]. 2004 [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <http://www.ebastlirna.cz/modules.php?name=News&file=article&sid=119>
- [9] CHMELÍK, Karel a Jiří POSPIŠILÍK. *Elektrické stroje v energetice*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, Regionální centrum celoživotního vzdělávání, 2003. ISBN 80-248-0314-3.
- [10] Transformátor – základní vlastnosti a dělení. *OENERGETICE.cz* [online]. 2015 [cit. 2016-1-15]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni/>
- [11] LIBRA, Jiří. *Elektrická zařízení 3: Transformátory* [online]. Žďár nad Sázavou [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://web.sstzr.cz/download/cat1/elektrotechnika/ez3-transformatory.pdf>
- [12] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2.
- [13] NAVRÁTILOVÁ, Eva. *TRANSFORMÁTORY* [online]. Havířov, 2009 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/esp/transformatory.pdf
- [14] SOUKUP, Ladislav. *Ztráty v nádobě transformátoru* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2016-02-07]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2823/bakalarska_prace.pdf?sequence=1
- [15] Zkratové napětí. *Elektrika.cz* [online]. 2014 [cit. 2016-2-21]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/terminolog/eterminologitem.2005-05-29.3263231497/view>
- [16] Měření transformátoru naprázdno a nakrátko [online]. VŠB-TUO [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/se/cast_B_el_stroje/se_es_c1_naprna_kr.pdf
- [17] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [18] Amorfnní transformátory. *Kočí Valášek* [online]. 2014 [cit. 2016-2-27]. Dostupné z: <http://transformatory.cz/nove-transformatory/kategorie/6>

- [19] VRÁNA, Václav. *TRANSFORMÁTOR* [online]. VŠB-TUO, 2005 [cit. 2016-02-03].
Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/BC_FBI/Prednasky/Trafa_bc.pdf

Přílohy

Schéma zapojení pro měření paralelního chodu

